

---

Effet des changements environnementaux sur  
les communautés phytoplanctoniques et évaluation  
des risques d'efflorescences d'algues toxiques  
(PhytoRisk)

Livrable : Données environnementales utilisées et  
modèles de la phénologie des espèces de phytoplancton



## Fiche documentaire

<b>Numéro d'identification du rapport</b> : RST.Dyneco Pelagos 2015.01		<b>date de publication</b> : 13 janvier 2015 <b>nombre de pages</b> : 56 <b>bibliographie</b> : oui <b>illustration(s)</b> : oui <b>langue du rapport</b> : français
<b>Diffusion</b> : libre : <input checked="" type="checkbox"/> restreinte : <input type="checkbox"/> interdite : <input type="checkbox"/>		
<b>Validé par</b> : Martin Plus Adresse électronique : Martin.Plus@ifremer.fr		
<b>Titre de l'article</b> Effet des changements environnementaux sur les communautés phytoplanctoniques et évaluation des risques d'efflorescences d'algues toxiques (PhytoRisk) Livrable : Données environnementales utilisées et modèles de la phénologie des espèces de phytoplancton		
Contrat n° AELB Phytorisk    Rapport intermédiaire <input checked="" type="checkbox"/> Rapport définitif <input type="checkbox"/>		
<b>Auteur(s) principal(aux)</b> : Carles Guallar-Morillo Annie Chapelle Cédric Bacher	<b>Organisme / Direction / Service, laboratoire</b> Ifremer, ODE/DYNECO/Pelagos	
Encadrement(s) : Annie Chapelle Cédric Bacher		
Cadre de la recherche : Convention AELB / IFREMER		
Destinataire : AELB		



## Sommaire

Introduction .....	6
Matériel et Méthodes.....	8
Description des différents types de données .....	8
Descripteurs dérivés .....	13
Phénologie.....	14
Modèle de prédiction en arbre de régression .....	17
Traitement des données.....	18
Analyse des variables environnementales.....	19
Température de l'eau.....	19
Salinité.....	19
Traceur .....	20
Chlorophylle.....	20
Décision sur les variables à utiliser.....	20
Résultats préliminaires .....	21
Paramètres phénologiques.....	21
Relation des paramètres phénologiques avec l'environnement.....	23
Modèles de prédiction .....	24
Conclusion et perspectives.....	26
Références .....	28
Annexe I .....	30
Annexe II.....	55
Annexe III .....	56



## Introduction

L'impact des changements environnementaux sur les écosystèmes marins côtiers a été démontré sur un nombre croissant d'écosystèmes. L'existence de réseaux de surveillance et d'observation du phytoplancton et des variables environnementaux représente une occasion d'améliorer notre compréhension des changements passés et de les évaluer. Ce projet se focalise plus spécialement sur l'analyse des liens entre variabilité environnementale et phytoplancton en mettant l'accent sur les efflorescences d'algues toxiques. Il y a plusieurs problématiques liées à ce phénomène naturel sur les côtes atlantiques françaises, dont les principales ciblées sont : *Alexandrium minutum*, *Pseudo-nitzschia* spp. et *Dinophysis*.

Nous avons tout d'abord commencé par le dinoflagellé *Alexandrium minutum*. Cette espèce, lorsque les conditions environnementales lui sont favorables, peut développer des efflorescences importantes. La première détection a été faite lors d'un épisode d'eau rouge dans le port d'Alexandrie (Egypte) en 1958 (Halim, 1960). Par la suite, il y eut plusieurs détections dans l'hémisphère nord (Nehring, 1994) et sur les côtes de l'Australie et de l'Asie (Bolch, Blackburn, Cannon, & Hallegraeff, 1991; Chang, MacKenzie, Till, Hannah, & Rhodes, 1995). Sur les côtes françaises, la première détection a eu lieu en 1988, dans l'estuaire de la Penzé, et c'est là même, en 1997, que la plus forte efflorescence a été enregistrée, avec 44 millions cel. L<sup>-1</sup>. Un autre bloom très important, plus récent, a été détecté en 2012 dans la Rade de Brest, avec 42 millions de cel. L<sup>-1</sup>. *A. minutum* produit de forts blooms essentiellement en région Bretagne, on le trouve également mais en plus faible abondance sur le littoral Atlantique. Le période des blooms se situe de la fin du printemps au début de l'été.

L'initiation de l'efflorescence provient de la germination des cellules de résistance (kystes) par remise en suspension du sédiment, lorsque les conditions environnementales deviennent favorables. L'arrêt du bloom serait dû à l'induction de la sexualité suite à un stress intracellulaire (limitation en nutriments, ...) et qui serait suivi d'un enkystement. D'autres hypothèses sont envisagées comme le broutage, le changement des conditions environnementales ou l'infection par des parasites (Chambouvet, Morin, Marie, & Guillou, 2008).

Cette espèce est productrice de toxines qui peuvent être accumulées par les coquillages et provoquer le syndrome PSP ('Paralytic Shellfish Poisoning') sur les personnes qui les consomment. C'est une problématique forte sur les côtes bretonnes. Il existe une économie importante basée sur la conchyliculture et cette profession est gravement touchée par les épisodes de toxicité. En Bretagne, sept zones ont souffert des épisodes de fermeture conchylicole : l'estuaire de la Penzé, la Rance, la baie de Morlaix, la Rade de Brest et les abers Benoit et Wrac'h. Sur la côte atlantique, il faut également ajouter, plus au sud, le bassin d'Arcachon.

Il est donc nécessaire de bien connaître les conditions d'apparition de l'espèce *A. minutum* pour pouvoir prédire ses efflorescences. C'est l'objectif du projet Phytorisk, qui complète d'autres études déjà réalisées en France et ailleurs qui abordent directement cette problématique ou qui bénéficient des données environnementales acquises dans le cadre d'autres projets:

- Réseau de surveillance du phytoplancton et des phycotoxines (REPHY), mis en place par l'Ifremer en 1984. Son objectif est d'acquérir des séries temporelles sur les communautés phytoplanctoniques pour étudier leur évolution, détecter et suivre les espèces toxiques qui sont nuisibles pour certains organismes marins et pour l'homme et prévoir les efflorescences phytoplanctoniques et leurs épisodes toxiques.
- Projet scientifique Final (2006-2008) : l'objectif était d'élaborer des modèles pour prédire l'initiation des efflorescences algales toxiques en Bretagne, en Irlande et en Ecosse. En Bretagne le projet était centré sur l'espèce *A. minutum*.
- Velyger (2008-présent) : ce projet vise à observer et analyser la variabilité de la reproduction et du recrutement de l'huître creuse, *Crassostrea gigas* sur les côtes françaises. Parmi ses actions on trouve un suivi de la communauté phytoplanctonique.
- Paralex (2010-2014) : ce projet avait pour objectif de comprendre comment et quels microorganismes pathogènes peuvent arrêter les proliférations algales toxiques comme *A. minutum*.
- Daoulex (2013-2014) : ce projet a pour objectif d'élucider les conditions de prolifération d'*A. minutum* en Rade de Brest dans le cadre des états initiaux des projets de développement du port de Brest.

Tous ces projets ont permis d'acquérir des données sur la biologie, la physiologie et l'écologie de cette espèce. L'approche différente que l'on propose avec Phytorisk repose sur l'étude les caractéristiques des efflorescences d'*A. minutum* sur les côtes françaises bretonnes et atlantiques à une échelle temporelle et spatiale plus grande. Pour pouvoir atteindre cet objectif, nous avons réuni l'ensemble des données disponibles sur le phytoplancton et

sur les variables hydrologiques à partir du réseau REPHY et d'autres projets cités auparavant. Nous avons ensuite ajouté d'autres décrypteurs intéressants pour cette étude comme certaines variables climatiques (Oscillation Nord Atlantique, ONA ; Oscillation Atlantique Multidécennale, OAM), les rivières (débit et nutriments), les variables issues de la télédétection (irradiance, température, chlorophylle et matière inorganique en suspension à la surface de la mer), le coefficient de marée et certaines variables météorologiques (pression atmosphérique, vitesse et direction du vent). Le volume de données acquis permet d'envisager une généralisation des conclusions obtenues.

Ces données seront analysées par deux méthodes différentes et complémentaires. La première approche consiste à préciser la niche écologique de cette espèce toxique. La niche écologique est définie par Hutchinson (1957) comme le volume de l'espace environnemental qui permet une croissance positive de l'espèce. Cela consiste à déterminer quelles sont les caractéristiques environnementales favorables pour le développement des efflorescences d'*A. minutum* d'après l'ensemble des observations. Ce travail sera exposé dans le prochain rapport du projet.

La seconde approche est l'étude phénologique des efflorescences d'*A. minutum*. On vise ici à caractériser les efflorescences dans leur déroulement temporel et à les mettre en relation avec le climat et les conditions environnementales (adapté de Lieth, 1970; van Vliet & De Groot, 2003). Pour atteindre cet objectif, il faut identifier les séries temporelles annuelles des efflorescences qui sont les mieux représentées et appliquer une méthodologie objective et reproductible pour les analyser. À partir des résultats obtenus, nous allons développer des modèles statistiques pour expliquer et prédire les différentes phases de l'efflorescence de cette espèce toxique.

En résumé, ce rapport présente les éléments suivants :

1. Identification et inventaire des données environnementales disponibles en relation avec l'espèce *A. minutum* sur les côtes bretonnes et atlantiques françaises.
2. Description de la méthodologie développée pour l'étude de la phénologie des efflorescences d'*A. minutum*.
3. Présentation des premiers résultats obtenus sur l'étude de la phénologie.

## Matériel et Méthodes

### Description des différents types de données

Nous avons utilisé un grand nombre de données différentes. On peut les agréger selon la source et le type de variables environnementales en : phytoplancton, hydrologie, télédétection, marée, rivières, modèles de rivière, données météorologiques et climatiques. La description de ces variables est présentée dans le tableau 2.1 et, dans l'Annexe I, on trouvera la représentation graphique des données utilisées sous forme de séries temporelles.

Données	Type de données	Source	Contact	Format fichier	Période	Fréquence
Phytoplancton	<i>Alexandrium minutum</i>	REPHY Finale Paralex Velyger Daoulex	Quadrige2  Annie.Chapelle@ifremer.fr	csv	1984 - présent Mai - Juillet / 1997 - 2005 Mai - Juillet / 2004 - 2012 2009 - 2013 Juillet 2013	2 fois/semaine - mensuel 2 fois/semaine - mensuel journalier - hebdomadaire hebdomadaire 2 fois/semaine
Hydrologiques	Chlorophylle Température Salinité Turbidité Oxygène Matière en suspension Matière en suspension organique Nutriments	REPHY Finale Paralex Velyger Daoulex	Quadrige2  Annie.Chapelle@ifremer.fr	csv	1984 - présent Mai - Juillet / 1997 - 2005 Mai - Juillet / 2004 - 2012 2009 - 2013 Juillet 2013	2 fois/semaine - mensuel 2 fois/semaine - mensuel journalier - hebdomadaire hebdomadaire 2 fois/semaine
Télédétection	Eclairement en Surface de la Mer Température en Surface de la Mer Chlorophylle en Surface de la Mer Matière inorganique en suspension	Ifremer	Francis.Gohin@ifremer.fr	netcdf	1984 - présent 1987 - présent 1999 - présent 1999 - présent	journalier
Coefficient marée	Coefficient marée	SHOM	www.shom.fr	csv	1950 - présent	journalier
Rivière	Débit	CDOCO	www.previm.org	csv	Variable (Table 2.4)	journalier
Modèle rivière	Traceur Nutriments Salinité Température	Ifremer / ONEMA	Alain.Menesguen@ifremer.fr	netcdf	2000 - 2010	journalier
Météorologiques	Pression atmosphérique Vent (vitesse/direction)	CDOCO	www.previm.org	netcdf	1997 - présent	horaire
Climatiques	Oscillation Atlantique Multidécennale Oscillation Nord-Atlantique classique Régimes d'Oscillation Nord-Atlantique	Climate Data Guide Cristophe Cassou	https://climatedataguide.ucar.edu/ cassou@cerfacs.fr	csv	1870 - présent 1899 - présent 1974 - présent	mensuel journalier / mensuel journalier

Tableau 2.1. Caractéristiques des données utilisées dans cette étude.

### Données Phytoplancton

Parmi les données de phytoplancton, on retiendra essentiellement la variable *A. minutum* qui est l'espèce cible de cette étude (d'autres planctons toxiques pourront être pris en compte en une deuxième phase, comme *Pseudo-nitzschia*). L'idée est de réunir le maximum de données disponibles sur cette espèce. Pour atteindre cet objectif nous avons rassemblé des données (i) en provenance du réseau d'observation et de surveillance du phytoplancton et des phycotoxines (REPHY), coordonné par l'Ifremer, (ii) en provenance de projets de recherche liés à la compréhension de l'écologie d'*A. minutum* (projets Daoulex, Paralex et Final) et enfin en provenance du projet Velyger.

Les données du REPHY, sont extraites de la base Quadrige2. Ce système d'information gère et valorise les données issues des réseaux de surveillance mis en oeuvre par l'Ifremer. On y trouve également certaines variables hydrologiques associées aux prélèvements de phytoplancton. Les données sont regroupées par régions (correspondant à des baies ou estuaire) dans lesquelles il peut y avoir plusieurs points de mesure appelés stations. Les stations sont codifiées de la suivant manière : les trois premiers chiffres sont le code de la région, la lettre désigne la stratégie de prélèvement (P, point de mesure ; T, transect de mesure) et finalement, les trois derniers chiffres codifient la station dans la région (exemples dans le tableau 2.2).

La méthodologie est la suivante :

- 1) D'abord, on a extrait toutes les données de phytoplancton en relation avec le genre *Alexandrium* dans toute la région d'étude. Nous avons retenu ensuite les seules données correspondant à l'espèce *A. minutum* et, à l'aide de l'avis d'experts, réintégré dans la base *A. minutum* les données du genre *Alexandrium* sans classification spécifique mais qui correspondent à *A. minutum*. Nous avons ensuite rajouté les données des autres projets d'étude correspondant à la région de la Loire-Bretagne (Daoulex, Velyger, Paralex et Final).
- 2) Ensuite, seules ont été retenues les stations situées dans les régions ayant eu au moins une occurrence d'*A. minutum* supérieure au seuil d'alerte, 10 000 cellules L<sup>-1</sup>. C'est la base de données primaire pour le travail sur *A. minutum*, qui servira pour les différentes approches à l'étude de sa problématique. Pour chaque approche (phénologie et niche écologique), des sous-bases de données ont été créées. Dans la première base ainsi constituée, on trouve environ 9 000 données correspondant à 17 régions marines différentes et représentées par 92 stations. La plupart de ces données sont situées dans la région Loire-Bretagne (à l'exception du bassin d'Arcachon). Les données correspondent à la période 1988-2013. L'abondance maximale est de 44 millions de cellules L<sup>-1</sup>, enregistrées dans l'estuaire de Penzé en 1997, mais on note aussi une valeur de 42 millions de cellules L<sup>-1</sup> en Rade de Brest en 2012.
- 3) Finalement, nous avons sélectionné les données pour l'approche phénologique. Pour pouvoir bien caractériser les blooms d'*A. minutum*, il faut avoir une bonne série temporelle annuelle constituée de suffisamment de valeurs, surtout dans la période d'efflorescence. Après avoir réalisé une exploration des données disponibles et essayé différentes combinaisons, nous sommes arrivés à la conclusion qu'il faut sélectionner des séries temporelles annuelles de plus de 8 données et une abondance maximale supérieure à 10 000 cellules L<sup>-1</sup>. Dans le tableau 2.2 sont présentées les caractéristiques de chaque station sélectionnée et dans la figure 2.1, leur localisation.

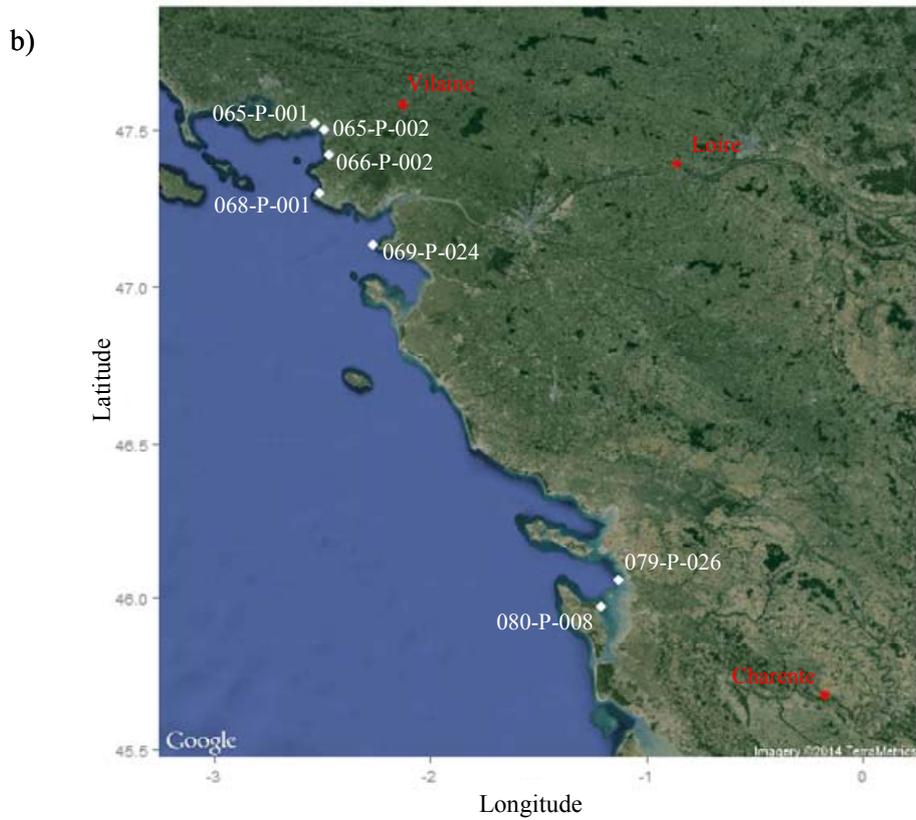
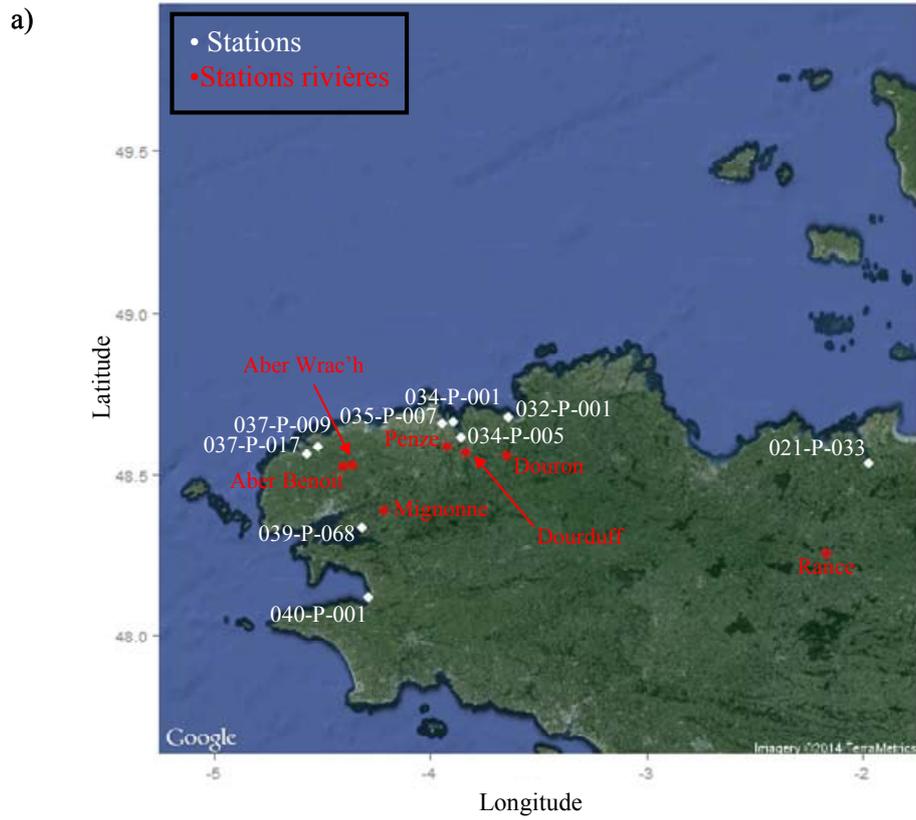


Figure 2.1. Distribution des stations sélectionnées pour l'étude phénologique d'*A. minutum* et des stations de contrôle des rivières correspondant dans (a) la Bretagne Nord et (b) la Bretagne Sud et le golfe de Gascogne.

Code Région	Nom Région	Code Station	Nom Station
021	Rance - estuaire et large	021-P-033	Port Saint Hubert
032	Baie de Lannion	032-P-001	Le Douron
034	Rivière de Morlaix	034-P-001 034-P-005	Pen al Lann Locquenolé
035	Penzé	035-P-007	Penzornou
037	Ouessant - Abers	037-P-009 037-P-017	Paluden Keramoal
039	Rade de Brest	039-P-068	La pointe du Château
040	Baie de Douarnenez	040-P-001	Kervel
065	Estuaire de la Vilaine	065-P-001 065-P-002	Kervoyal Le Halguen
066	Pen Bé	066-P-002	Merquel
068	Traicts du Croisic	068-P-001	Le Croisic (a)
069	Loire - large	069-P-024	Pointe St Gildas large
079	Pertuis d'Antioche	079-P-026	Le Cornard
080	Marennes Oléron	080-P-008	Boyard

Tableau 2.2. Liste des stations utilisées pour l'étude de la phénologie des efflorescences d'*A. minutum*.

### Données hydrologiques

Les données hydrologiques comprennent les variables qui sont mesurées dans l'échantillon d'eau et qui donnent une description physicochimique et biologique de l'échantillon. Dans cette étude, nous avons récupéré les variables chlorophylle, température, salinité, turbidité et oxygène. On peut voir leurs caractéristiques dans le tableau 2.3. Elles sont extraites de la base Quadrigé2, pour les stations correspondantes aux données *A. minutum* et aussi extraites des autres projets de recherche mentionnés auparavant. La disponibilité des données hydrologiques dépend du paramètre choisi et ne correspond pas forcément à la même quantité de données que l'abondance cellulaire. En fait, un groupe de variables reste non disponible pour les séries analysées dans ce rapport. Ce sont : la matière en suspension (MES), la matière en suspension organique (MESORG) et les nutriments (ammonium, nitrite, nitrate, phosphate et silicate). Pour ces variables nous avons par conséquent utilisé des proxies.

Paramètres <i>in situ</i>	Minimum	Maximum	Nombre de données	Regions disponibles
<i>Alexandrium minutum</i> (Cel L <sup>-1</sup> )	0	7 985 000	1 169	13
Chlorophylle (mg m <sup>-3</sup> )	0.0	17.5	557	8
Température (°C)	3.1	23.6	857	11
Salinité (PSU)	7.3	37.2	1 104	11
Turbidité (NTU)	0.55	72.00	1 038	12
Oxygène (mg L <sup>-1</sup> )	7.30	14.95	119	3

Tableau 2.3. Résumé des données hydrologiques.

### Données de télédétection

La télédétection comprend l'ensemble des procédés et techniques qui permettent d'acquérir des caractéristiques de la surface terrestre à partir de satellites, en utilisant les propriétés des ondes électromagnétiques émises ou réfléchies par cette surface. Avec cette méthodologie, on peut obtenir plusieurs caractéristiques de la couche de surface de l'océan. Pour cette étude, les données télédétection récupérées sont : la température de l'eau de surface, l'éclairement en surface, la chlorophylle de surface et les matières inorganiques en suspension.

La disponibilité des données chlorophylle et matières inorganiques en suspension ne démarre qu'à partir de 1999, alors que la première détection d'*A. minutum* sur les côtes littorales de Loire-Bretagne est en 1987. L'éclairement et la température de surface de la mer sont mesurés depuis 1984 et 1987 respectivement. Un autre élément à prendre en compte est la résolution de ce type de données. Dans l'espace de mesures, chaque valeur

correspond à un pixel qui, en fonction du paramètre et de l'année, peut mesurer de 1km<sup>2</sup> jusqu'à 4km<sup>2</sup>. En conséquence, la valeur que l'on obtient est le résultat de l'intégration sur une surface qui peut plus ou moins correspondre à la valeur de la station. Selon le même raisonnement, comme la majorité des stations touchées par la problématique des blooms d'*A. minutum* sont confinées dans les estuaires, la résolution des données satellitales est insuffisante pour obtenir une valeur pour ces stations. Dans ces cas, il faut obtenir la valeur du pixel le plus proche de la station, en général plus au large. Un autre biais possible est la coïncidence entre l'heure de l'échantillonnage *in situ* et l'heure où le satellite prend la donnée. Cela peut induire une différence notable.

Pour pallier à tous ces biais possibles, il faut procéder à des analyses statistiques de validation pour s'assurer que les données utilisées ont un rapport logique avec les valeurs *in situ*.

### ***Coefficient de marée***

Les estuaires de la Bretagne constituent des milieux originaux parmi les systèmes côtiers de l'océan mondial par l'influence très marquée des marées de grande amplitude pouvant atteindre jusqu'à 10m de marnage (Morin et al., 2000). Cette caractéristique peut avoir une influence importante sur le développement des proliférations d'*A. minutum* par un effet dilution/rétention. Les marées sont le résultat de l'attraction de la lune et du soleil sur les mers et océans. Il y a deux valeurs journalières correspondant à chaque période de pleine et basse mer. Comme approximation à la valeur de marée, on a utilisé le coefficient de marée, dont la valeur varie entre 20 et 120.

En France, les coefficients de marée sont calculés par le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) pour le port de Brest et considérés comme identiques sur les côtes atlantiques et de la Manche car l'onde de marée qui les atteint n'est que faiblement perturbée. Le marnage, différence entre les hauteurs de pleine mer et de basse mer successives, est par contre différent selon la situation géographique, mais ces données sont en cours d'acquisition.

### ***Résultats modèles fleuves***

Dans cette section, il s'agit des données qui sont extraites d'un modèle opérationnel développé dans le but de déterminer les bassins récepteurs marins des principaux 45 fleuves français de la façade Manche-Atlantique et leurs niveaux d'influence durant les années 2000 à 2010 (Ménesguen & Dussauze, 2014). Les principaux descripteurs que nous avons retenus à partir de ce travail sont: le 'traceur, qui mesure l'influence de chacun des 45 fleuves modélisés sur la côte atlantique, la température et la salinité simulées pour chaque station de notre étude. Ce même modèle fournit également des modèles statistiques des concentrations des différents nutriments dans les 45 fleuves sur la même période. Les nutriments modélisés sont :

- Nitrate
- Ammonium
- Phosphate
- Silicate
- Azote organique
- Phosphore non inorganique dissous
- Matières en suspension

Comme dans le cas des données satellitales, il y a aussi une limitation liée aux années disponibles et à la résolution du modèle. Une étape de comparaison et de validation de ces données avec les données *in situ* a été nécessaire.

### ***Données fleuves***

Les fleuves sont l'un des facteurs d'influence majeurs sur les estuaires et les zones côtières. Ils peuvent influencer la stabilité de la colonne d'eau et sont aussi importants pour l'apport de nutriments dans l'écosystème côtier. Le paramètre utilisé ici est le débit du fleuve (m<sup>3</sup> jour<sup>-1</sup>). Ces données sont extraites de la base de données du Centre de Données pour l'Océanographie Côtière Opérationnelle (CDOCO). Ce serveur centralise les données qui sortent des stations de contrôle des débits des fleuves français. Il n'y a pas de station pour tous les fleuves et, pour les fleuves ayant une station, il faut vérifier les années où cette station était active (Tableau 2.4).

Rivière	Station contrôle	Code station	Longitude	Latitude	Début	Fin	Min débit	Max débit	Moyenne débit
Rance	Rance - Saint-Jouan-de-l'Isle	IF000439	-2.168	48.254	22/09/1984	31/12/2012	0.00	80.2	2.61
Douron	Douron - Ponthou	IF000609	-3.646	48.556	16/03/1989	06/05/2013	0.08	2.9	0.43
Dourduff	Queffleuth - Plourin [3 Chenes]	IF000130	-3.837	48.568	14/12/1988	31/12/2012	0.02	7.4	0.52
Penze	Penze - Taule [Penhoat]	IF000129	-3.924	48.586	01/01/1967	31/12/2012	0.05	41.9	2.83
Aber Benoit	Aber-Benoit - Plabennec	IF000098	-4.407	48.524	07/10/1978	31/12/2012	0.05	4.1	0.50
Aber Wrac'h	Aber-Wrac'h - Drennec	IF000100	-4.362	48.531	23/06/1966	31/12/2012	0.07	3.3	0.44
Mignonne	Mignonne - Irillac	IF000126	-4.215	48.387	08/04/1971	01/09/2013	0.10	16.9	1.45
Vilaine	Vilaine - Rieux [Pont de Cran]	IF000272	-2.126	47.580	08/08/2002	19/04/2014	0.04	1430.0	72.25
Loire	Loire - Monjean-sur-Loire	IF000125	-0.861	47.392	01/01/1937	20/04/2014	50.00	6100.0	840.20
Charente	Charente - Jarnac	IF000109	-0.177	45.679	01/01/2002	17/12/2012	0.00	278.0	39.13

Tableau 2.4. Liste et caractéristiques des rivières retenues.

### Données météorologiques

Les données météorologiques utilisées pour cette étude sont : la direction et la vitesse du vent et la pression atmosphérique. Le vent est un facteur important pour le contrôle de la stabilité de la colonne de l'eau et la pression atmosphérique est un indicateur général sur la stabilité des masses d'air. Ces données sont acquises à partir de modèles numériques opérés par MétéoFrance (trois modèles se succèdent au cours des années, ils sont de résolution différente, tableau 2.5) : Aladin, Arpège et Arôme. L'avantage d'utiliser les données de ces modèles est qu'ils couvrent tout l'espace géographique. Mais, comme pour les données satellitales ou les données du modèle des bassins versants, il s'agit de données sur une surface et non en un point.

Variable Météorologique	Modèle	Echelle	Résolution	Date début	Date fin	
Vent	Direction	Aladin	Mondiale	15 km	03/07/1997	29/03/2012
	Vitesse	Arpège	Europe	5 km	30/03/2006	07/12/2013
Pression atmosphérique		Arôme	France	2.5 km	12/10/2011	Maintenant*

Tableau 2.5. Caractéristiques des modèles numériques météorologiques. \*La date de la fin de ce rapport est Décembre 2014.

### Données index climatiques

Récemment, l'intérêt de connaître la variabilité climatique à macro-échelle a pris de l'ampleur et plusieurs indicateurs climatiques ont été proposés pour l'Océan Atlantique. L'Oscillation Nord Atlantique (ONA) et l'Oscillation Atlantique Multidécennale (OAM) sont les plus étudiés.

L'index ONA est une mesure des changements dans la pression atmosphérique entre les Açores et l'Islande. Cette oscillation climatique a une forte influence sur le régime des vents d'ouest qui traversent l'océan Nord Atlantique, ainsi que sur les températures et la pluviosité de l'Europe. Il existe différents calculs pour cet index. Pour cette étude, nous en avons choisi deux. Le premier, classique, développé par James W. Hurrell (Hurrell, 1995), dans lequel on obtient une valeur qui peut être positive (phase ONA +), ou négative (phase ONA -), et le second, développé par Christophe Cassou (Cassou, 2008), dans lequel on a une classification en 4 régimes ONA climatiques différents pour l'hiver et pour l'été.

L'index OAM est un signal à échelle quasi globale de la variabilité climatique multidécennale (Dijkstra, te Raa, Schmeits, & Gerrits, 2006). Il fait ressortir les alternances entre phases chaudes et froides. Il a une relation avec la variabilité de la température de l'eau en surface et celle de la pluviosité dans l'Océan Atlantique. Cet index est représenté par une valeur journalière qui peut être positive (OAM +) ou négative (OAM -).

### Descripteurs dérivés

Dans la section 2.1 ont été présentées les différentes variables que l'on peut utiliser. On ajoute à ce tableau des données, la donnée correspondant au jour de l'échantillon *in situ*. Comme les valeurs antérieures et postérieures peuvent avoir aussi une influence importante sur les processus impliqués dans la dynamique d'*A. minutum*, nous avons également calculé des descripteurs dérivés, avec l'intention d'intégrer l'historique du paramètre original dans une valeur. Ce calcul a été fait seulement avec les descripteurs qui présentent une fréquence régulière, au minimum journalière (tableau 2.1). Cela concerne les variables de télédétection (irradiance, température de l'eau, chlorophylle et matière inorganique en suspension en surface de la mer), le coefficient marée, le débit du fleuve, les nutriments fluviaux en provenance des modèles statistiques, la pression atmosphérique, le vent (vitesse et direction) et les index climatiques (Oscillation Nord-Atlantique et Oscillation Atlantique

Multidécennale). Les variables dérivées sont les moyennes, moyennes pondérées, maxima et minima sur une période de trois, cinq et sept jours avant, après ou au milieu de la date de l'échantillon.

Un autre type de paramètre dérivé est l'anomalie d'une variable. On peut définir ce concept comme la différence qu'il existe entre une valeur réelle ponctuelle et une moyenne de valeurs sur une période plus longue. Les valeurs d'anomalies peuvent être positives ou négatives. L'année de référence est obtenue en calculant la moyenne de chaque jour de l'année pour toutes les années disponibles. Ensuite, pour obtenir l'anomalie du jour, on soustrait la valeur du jour de la valeur de référence correspondante (figure 2.2). Nous avons calculé les anomalies sur les mêmes variables journalières que celles citées auparavant.

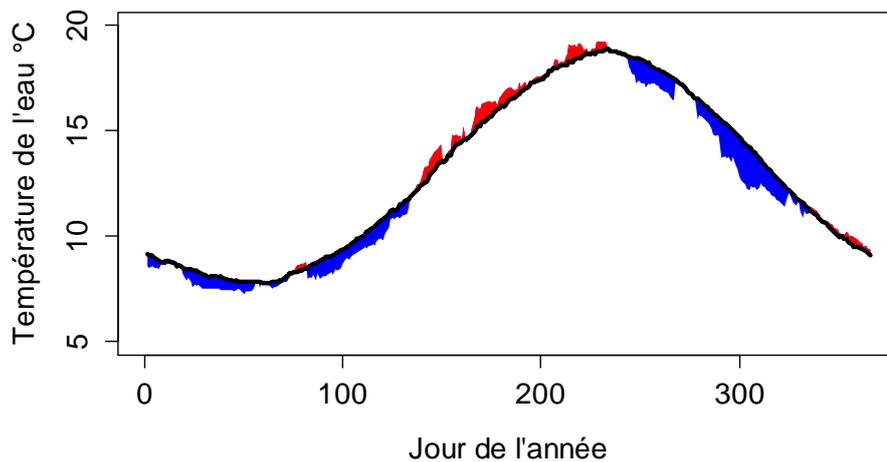


Figure 2.2. Exemple de calcul de l'anomalie de la température de l'eau de l'année 1992 dans la station 021-P-033. La ligne représente la température moyenne pour toute la période de données disponibles (1984-2013). L'aire rouge représente les anomalies positives et l'aire bleue représente les anomalies négatives de l'année 1992.

La littérature scientifique a souvent montré que les événements qui arrivent durant l'hiver peuvent influencer les dynamiques de différents processus biologiques pendant l'année, notamment ceux correspondant aux populations planctoniques (Irigoien, Harris, Head, & Harbour, 2000; Weyhenmeyer, Blenckner, & Pettersson, 1999). Nous avons donc calculé les moyennes sur la période hivernale de la température de l'eau, de l'irradiance et des index climatiques.

Finalement, dans le domaine de la phénologie, nous avons vu aussi que l'accumulation journalière de certains descripteurs est importante pour quelques processus biologiques, comme le démarrage de la floraison (Bonhomme, 2000). Pour obtenir ce paramètre on doit additionner les valeurs journalières durant une période définie. Nous avons calculé ces variables pour l'irradiance et la température de l'eau et nous appelleront les descripteurs dérivés Irradiance-jour et Degré-jour, respectivement. Dans notre cas, nous avons calculé cette accumulation depuis le premier Janvier jusqu'aux différentes dates cardinales, c'est-à-dire, les jours de démarrage, d'abondance maximale et de la fin de l'efflorescence d'*A. minutum*.

## Phénologie

Le but d'une étude phénologique est de caractériser les différents événements de la phase de la vie d'une espèce. Il faut utiliser une méthodologie objective et fiable. Il existe plusieurs stratégies pour faire ce type d'étude sur le phytoplancton. Le choix de la méthode dépend des questions que l'on se pose, des caractéristiques de l'espèce ou de la communauté ou de l'écosystème que l'on veut étudier et des données disponibles. Par exemple, si on veut déterminer la date de démarrage d'un bloom, une méthode utilisée habituellement est de détecter quand l'abondance d'une espèce ou la concentration de chlorophylle est supérieure à un pourcentage (5-10%) de la moyenne de l'année (Beliaeff et al., 2001; Siegel, Doney, & Yoder, 2002). Plus d'exemples sont donnés dans Ji, Edwards, Mackas, Runge, & Thomas, 2010 et les publications citées. Dans notre cas, nous nous sommes intéressés à déterminer et à caractériser les différentes phases du bloom d'*A. minutum* (figure 2.3):

1. Abondance maximale
2. Date de l'abondance maximale
3. Date de démarrage

4. Date de fin du bloom
5. Durée du bloom
6. Durée de la phase de croissance
7. Durée de la phase de décroissance
8. Pente de la phase de croissance
9. Pente de la phase de décroissance

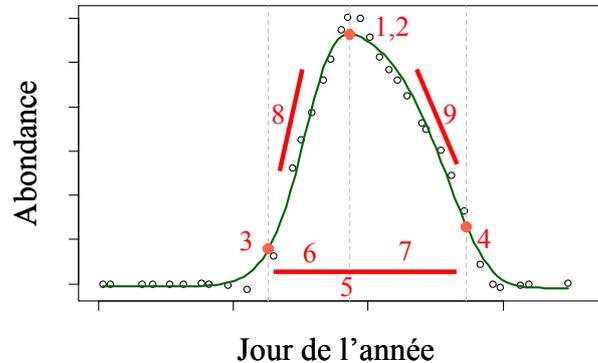


Figure 2.3. Différents paramètres qui caractérisent les efflorescences d'*A. minutum*. Les dénominations de chacun des paramètres sont dans le texte.

Les quatre premiers paramètres sont ceux qu'il faut déterminer à partir des données, et les cinq derniers sont calculés à partir des quatre premiers.

La méthodologie que nous avons choisie pour déterminer les quatre premiers est celle de Rolinski *et al.* (2007). Elle est basée sur l'utilisation de la fonction de Weibull pour obtenir un modèle de l'efflorescence. Cette fonction recouvre toute une famille de lois servant à décrire des distributions quasi-symétriques. Ces distributions ont en commun des valeurs positives ou des valeurs supérieures à une valeur donnée. Elles partent d'une fréquence d'apparition nulle, croissent jusqu'à un maximum et finalement décroissent, ce qui correspond bien au schéma des efflorescences d'*A. minutum*. De plus, avec cette distribution, on peut obtenir différents paramètres pour la phase de croissance et de décroissance des efflorescences.

Les différentes étapes suivies sont les suivantes : transformation des données, ajustement de la fonction de Weibull, intégration de la fonction et calcul des paramètres phénologiques (figure 2.4).

#### I.- Transformation des données

Les points plus problématiques permettant de définir le bloom sont la date de début et de fin. Les données d'abondances d'*A. minutum* sont transformées en logarithme base 10 :

$$y' = \log_{10}(y + 1)$$

$y$  étant l'abondance d'*A. minutum* en nombre de cellules  $L^{-1}$  et  $y'$  le résultat de la valeur transformée. Avec cette transformation, on réduit le poids des valeurs les plus hautes et l'ajustement du modèle de bloom (application de la fonction de Weibull dans notre cas) est meilleur.

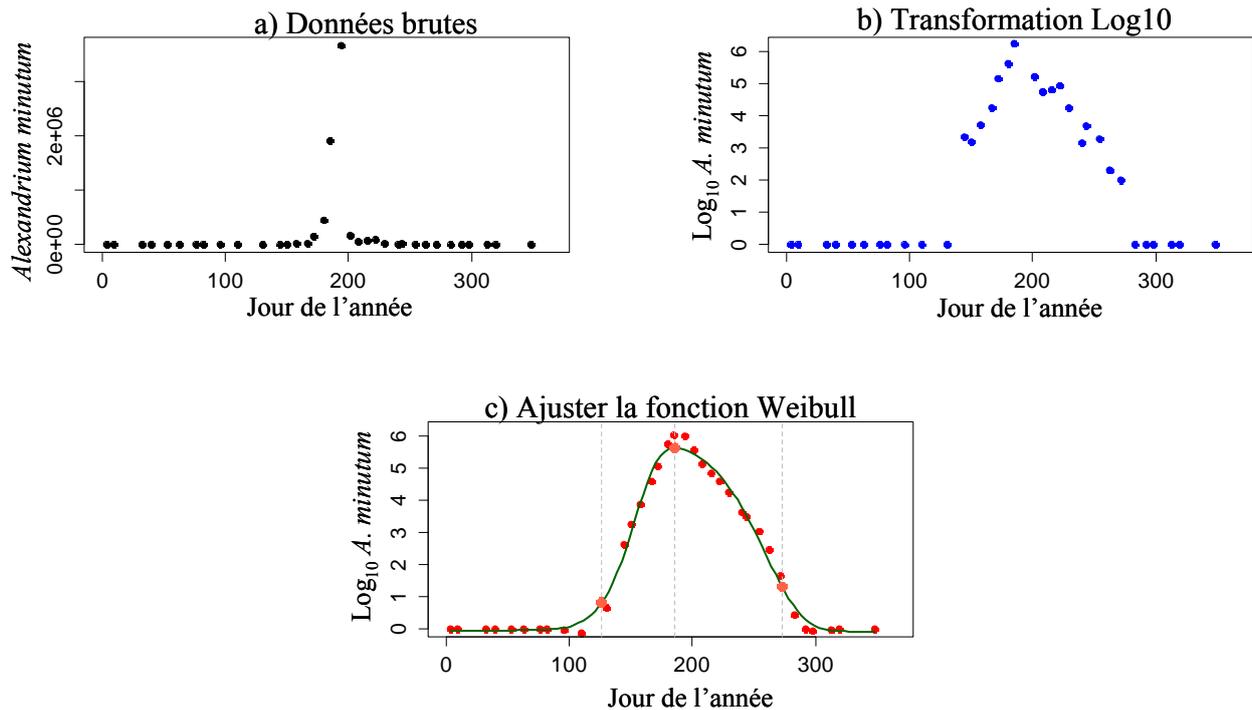


Figure 2.4. Phases de manipulation de données pour caractériser les efflorescences d'*A. minutum*.

## II.- Ajustement de la fonction de Weibull

La fonction de Weibull utilisée par Rolinski et al., 2007 s'écrit comme suit:

$$w(x) = (d + \exp(-(x/e)^f)) \times (1 - a \exp(-(x/b)^c))$$

$x$ , est le jour de l'année,

$a$ , la valeur de départ de la phase de croissance,

$b$ , le point d'inflexion de la phase de croissance,

$c$ , le paramètre qui définit la forme de la phase de croissance,

$d$ , la valeur de fin de la phase de décroissance,

$e$ , le point d'inflexion de la phase de décroissance,

$f$ , le paramètre qui définit la forme de la phase de décroissance.

En raison des caractéristiques des efflorescences d'*A. minutum*, c'est-à-dire de sa disparition avant et après le bloom, on a fixé les paramètres  $a$  et  $d$  à les valeurs de 1 et 0 respectivement. Cela revient à dire que l'abondance d'*A. minutum* au début et à la fin du phénomène est zéro. De cette façon, on simplifie les calculs pour ajuster la fonction de Weibull aux données.

## III.- Calcul de l'intégrale de la fonction

Après avoir obtenu le modèle de l'efflorescence avec la fonction de Weibull, on va définir les dates cardinales. La date du maximum d'abondance est la date du maximum de la valeur avec le modèle. Une fois définie la date du maximum, l'aire sous la courbe est calculée comme l'intégrale des valeurs avant et après cette date séparément. On définit ainsi la date de démarrage du bloom comme le quantile 2% de l'aire sous la courbe avant la date du maximum et la date de fin du bloom comme le quantile 98% de l'aire sous la courbe après la date du maximum.

## IV) Calcul des paramètres

A ce stade on a déjà quatre paramètres qui caractérisent les blooms d'*A. minutum*. Ce sont : les dates de démarrage, du maximum d'abondance et de fin du bloom, et l'abondance maximale. A partir de ces paramètres, on peut calculer les autres.

- Durée du bloom : c'est la différence entre les dates de fin et de démarrage du bloom.

- Durée de la phase de croissance : c'est la différence entre les dates d'abondance maximale et de démarrage du bloom.
- Durée de la phase de décroissance : c'est la différence entre les dates d'abondance maximale et de fin du bloom.
- Pente de la phase de croissance : il est calculé avec la formule suivante:

$$\mu_c = \log(x_{\max} / x_0) / t_c$$

$\mu_c$  étant le taux de croissance en jour<sup>-1</sup>;  $x_{\max}$  la valeur d'abondance maximale d'*A. minutum* sans transformation logarithmique;  $x_0$ , la valeur d'abondance d'*A. minutum* au début de l'efflorescence ; et  $t_c$ , la durée de la phase de croissance. Par rapport à la valeur  $x_0$ , définie initialement à 0 cellules L<sup>-1</sup>, on l'a fixé ici à 100 cellules L<sup>-1</sup>, car c'est la valeur minimum qui existe dans le tableau des données à l'exception des zéros (100 Cell L<sup>-1</sup> correspond à l'observation d'une cellule sous le microscope).

- Pente de la phase de décroissance : il est calculé avec la formule suivante:

$$\mu_d = \log(x_f / x_{\max}) / t_d$$

$\mu_d$  étant le taux de décroissance en jour<sup>-1</sup>;  $x_{\max}$  la valeur d'abondance maximale d'*A. minutum* sans transformation logarithmique;  $x_f$ , la valeur d'abondance d'*A. minutum* à la fin de l'efflorescence ; et  $t_d$ , la longueur de la phase de décroissance. Par rapport à la valeur  $x_0$ , comme dans le cas du calcul de la pente de la phase de croissance, initialement définie à 0 cellules L<sup>-1</sup>, elle est fixée ici à 100 cellules L<sup>-1</sup>, car c'est la valeur minimum qui existe dans le tableau des données.

### Modèle de prédiction en arbre de régression

Dans ce rapport d'étape, on présente déjà un modèle de prédiction sur un des paramètres phénologiques obtenus pour les efflorescences d'*A. minutum*. Le type de modèle que nous avons utilisé est l'arbre de régression.

Ce modèle est basé sur l'utilisation d'un arbre de décision dans lequel on peut répartir une population de données en groupes homogènes, selon un ensemble de variables discriminantes et en fonction de la variable que l'on veut prédire. Un arbre peut avoir plusieurs décisions pour former les groupes. Chaque décision concerne uniquement un groupe, et est basée automatiquement sur une variable discriminante sous forme dichotomique. Chaque fois que le modèle prend une décision, le groupe de données est divisé en deux groupes et chaque groupe aura comme valeur représentative de la variable à prédire la moyenne de ses valeurs. Le nombre de décisions du modèle est fixé à partir des critères qu'impliquent le nombre de données qu'il y a dans un groupe avant ou après l'application de la décision (figure 2.5).

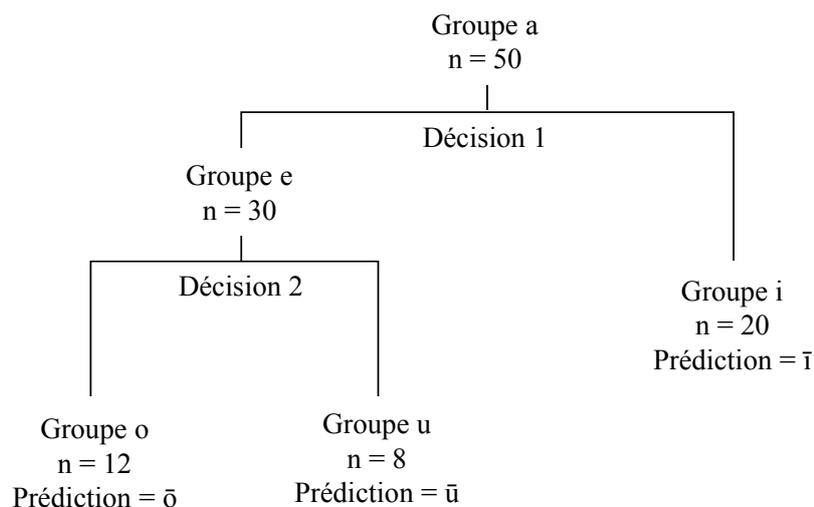


Figure 2.5 Représentation graphique d'un modèle de prédiction en arbre de régression avec deux décisions dichotomiques (1 et 2) et trois groupes de prédiction (i, o et u) avec une valeur de prédiction chacun ( $\bar{i}$ ,  $\bar{o}$  et  $\bar{u}$ , respectivement).

La prédiction est ensuite construite par l'application successive des décisions du modèle obtenu avec les nouvelles valeurs jusqu'à trouver un groupe final. La prédiction de ces nouvelles valeurs sera la valeur moyenne du groupe auquel le processus est arrivé.

### Traitement des données.

Dans cette étude nous avons eu besoin d'agréger le nombre maximum de descripteurs environnementaux et de données possibles pour pouvoir obtenir les résultats et les conclusions les plus généraux possibles. Pour cela, il a fallu travailler avec des fichiers quelque fois très grands et ayant des formats de codification différents (CSV, NETCDF). C'est la raison pour laquelle nous avons utilisé le logiciel R. Ce dernier permet d'avoir une grande flexibilité dans les processus d'agrégation de données, de traitement statistique, de représentation graphique et de développement de modèles. Il permet de travailler avec des fichiers d'information de grande taille, et propose déjà de nombreux 'packages' de fonctions qui permettent par exemple d'ouvrir des fichiers au format NETCDF ou d'utiliser des test statistiques classiques ou plus nouveaux. C'est de plus un logiciel gratuit largement utilisé par la communauté des statisticiens.

## Analyse des variables environnementales

Après l'obtention des variables par différentes méthodes (*in situ*, télédétection, modèle opérationnel hydrodynamique), nous avons pu disposer de séries temporelles journalières longues en différentes coordonnées de la zone côtière. Ces données environnementales pourront ensuite être utilisées brutes ou bien traitées de manière à retenir différentes informations pour le même paramètre (par exemple, la moyenne de température de l'eau dans les mois d'hiver, ou des valeurs d'anomalies) et même compléter des valeurs manquantes quand une donnée environnementale n'est pas mesurée le jour d'échantillonnage *d'A. minutum* (absence du paramètre, faille dans le capteur de température ou salinité, erreur dans le mesure de chlorophylle, etc.).

Afin de pouvoir utiliser ces mesures complémentaires, il nous a fallu les valider, c'est-à-dire vérifier que les données complémentaires reflètent les mêmes informations que les données *in situ* lorsqu'elles existent. Pour cela, nous avons comparé entre elles les données disponibles. Le tableau 3.1 présente les variables ayant été analysées pour validation.

<b>Variables</b>	<b>Télédétection</b>	<b>Modèle hydrodynamique</b>
Température de l'eau	<b>X</b>	<b>X</b>
Salinité	-	<b>X</b>
Traceur	-	<b>X</b>
Chlorophylle	<b>X</b>	-

Tableau 3.1. Comparaisons réalisées entre variables mesurés *in situ*, satellite et modèle hydrodynamique.

### Température de l'eau

Le résultat de la comparaison entre la température de l'eau *in situ*, satellite et modélisée est résumé dans le tableau 3.2. On peut voir qu'en général, la corrélation est très bonne. Toutefois si on regarde en détail (Tableau Annexe IIa), on peut voir que la station 065-P-002, et, dans une moindre mesure, la station 032-P-001, ont une corrélation plus faible. Pour expliquer cela on peut avancer la combinaison de différents facteurs, par exemple : le faible nombre de données existantes sur ces stations, la situation des stations proches de la côte ou des embouchures des rivières. Il n'y a pas de données satellitales ou issues de modèle à ces stations ce qui implique le choix de données situées plus au large, et donc moins sous l'influence de la rivière associée à la station. Un autre facteur peut être la différence entre l'heure de prélèvement *in situ* et le moment où le satellite prend les données ou bien le moment où la valeur est extraite du modèle (amplitude thermique journalière).

<b>Température de l'eau</b>	<b><i>in situ</i></b>	<b>Télédétection</b>	<b>Modèle</b>
<b><i>in situ</i></b>	1 (857)	0.93 (857)	0.94 (236)
<b>Télédétection</b>	-	1 (1 167)	0.97 (480)
<b>Modèle</b>	-	-	1 (482)

Tableau 3.2. Résultat des corrélations réalisées entre température de l'eau *in situ*, satellite et modèle des bassins récepteurs. Entre parenthèse figure le nombre de données disponibles pour ces corrélations.

### Salinité

Dans le tableau 3.3, on peut voir que la corrélation entre les données de salinité *in situ* et celles du modèle est faible. Si l'on regarde en détail les corrélations pour chaque station (Annexe IIb), des résultats très variables apparaissent, entre -0.47 et 0.85. Les raisons invoquées pour la comparaison entre les variables de température restent valables pour la salinité. Il est aussi possible que la modélisation de la salinité pour chaque station soit plus difficile du fait des particularités de la circulation des eaux continentales dans chaque embouchure et/ou de la résolution du modèle hydrodynamique.

	Traceur	Salinité <i>in situ</i>	Salinité Modèle
Traceur	1 (427)	-0.46 (380)	-0.50 (427)
Salinité <i>in situ</i>	-	1 (1104)	0.53 (435)
Salinité Modèle	-	-	1 (482)

Tableau 3.3. Résultat des corrélations réalisées entre la salinité *in situ* et le 'traceur' simulé pour évaluer les bassins récepteurs. Entre parenthèse figure le nombre de données disponibles pour ces corrélations.

### Traceur

Comme mentionné ci-dessus, le traceur est une mesure de l'influence d'un fleuve sur les stations d'échantillonnage. C'est un paramètre qui indique les principaux apports d'eau douce et de nutriments par les différents fleuves pour chaque station d'échantillonnage. Nous avons comparé ce paramètre avec la salinité, qui est un paramètre modifié par l'influence des fleuves (Tableau 3.3, détaillé par stations dans l'Annexe IIb). Dans les deux cas (salinité *in situ* et modèle), la corrélation est négative, ce qui provient du fait que plus l'influence de la rivière est grande, plus basse sera la salinité. Apparemment, le résultat global est semblable entre traceur et salinité *in situ* et entre traceur et salinité du modèle, cependant si on regarde en détail chaque station, la corrélation est différente. Il faut noter que le traceur n'est pas une mesure directe de la salinité : plusieurs fleuves peuvent influencer la salinité d'une station. De plus, les mêmes biais évoqués pour la modélisation de la température et de la salinité, c'est-à-dire la résolution temporelle et spatiale du modèle, interviennent également.

### Chlorophylle

Le paramètre de la chlorophylle obtenu par satellite est comparé avec la donnée *in situ* quand elle est disponible. Le résultat général de la corrélation est de  $R = 0.30$  ( $n = 385$  données comparées). On peut voir que la corrélation est positive mais très faible voire même négative pour la station 040-P-001 (résultats détaillés par station dans l'Annexe IIc). Il y a différentes raisons pour cela. On retrouve les mêmes raisons déjà exposées sur les données de télédétection : la résolution de la maille des valeurs satellitaires, la situation du point de mesure *in situ* à l'intérieur des estuaires, et finalement, l'heure à laquelle les mesures *in situ* et celle du satellite sont faites. Tout cela contribue à expliquer les différences et de plus, dans le cas de la chlorophylle, la distribution naturelle du phytoplancton en tâches fait que des stations très proches entre elles (on peut parler de dizaines de mètres) peuvent présenter des différences de valeurs importantes, alors que ces différences sont lissées à l'échelle du pixel.

### Décision sur les variables à utiliser.

En ce qui concerne la température, la corrélation entre les trois variables (*in situ*, satellite et modèle) est très bonne. Cela permet d'utiliser l'une ou l'autre de ces variables pour cette étude. La plus appropriée reste la température *in situ* parce que c'est la valeur de référence. Mais ce paramètre présente presque 50% de valeurs manquantes, ce qui peut gêner les analyses pour notre étude. Nous avons déjà mentionné que les corrélations entre température satellite, température modélisée et température *in situ* est excellente. Il est possible d'utiliser l'une ou l'autre en substitution, mais le nombre de données disponibles pour la température satellite (1 167) est supérieur au nombre des données obtenues avec le modèle (482). Nous avons donc décidé d'utiliser la température de l'eau mesurée par le satellite pour cette étude, au lieu de la température *in situ*.

Les corrélations obtenues entre salinité *in situ* et modélisée sont faibles et très dépendantes de la station. Les particularités de chaque station sont importantes et peuvent influencer le résultat obtenu par le modèle de fleuve. En conclusion, si on utilise ce paramètre du modèle il faut le faire avec précaution notamment en examinant les résultats obtenus. Du fait du nombre important de valeurs disponibles en salinité *in situ* (il manque seulement environ 5% des données), ce sont celles-ci qui seront gardées pour les analyses de la phénologie.

L'analyse du traceur a montré que l'information qu'apporte ce paramètre est différente de ce que donne la salinité. Bien que lié à l'influence du fleuve sur la station correspondante, il ne peut donc pas être utilisé comme un proxy de la salinité pour notre étude.

Le dernier paramètre étudié, la chlorophylle, a montré une faible corrélation entre ce paramètre mesuré *in situ* et estimée par le satellite. Cela ne veut pas dire que la valeur satellite est incorrecte mais il faut prendre conscience des limitations de son utilisation.

## Résultats préliminaires

### Paramètres phénologiques

Selon les critères définis pour sélectionner les séries temporelles annuelles nous avons obtenu un total de 37 jeux de données différents qui correspondent à 13 régions REPHY et 16 stations au total. Les caractéristiques de ces séries sont présentées dans la tableau 4.1 et on pourra se référer à l'Annexe III pour trouver les représentations des 37 modèles ajustés à partir desquels nous avons obtenu les paramètres phénologiques. On notera que sur les 13 régions sélectionnées, 11 se situent dans la zone Loire-Bretagne.

Série temporelle	Region	Nom region	Station	Nom station	Longitude	Latitude	Année
021-P-033_1996			021-P-033	Port Saint Hubert	-1.973	48.535	1996
021-P-033_1997			021-P-033	Port Saint Hubert	-1.973	48.535	1997
021-P-033_1998			021-P-033	Port Saint Hubert	-1.973	48.535	1998
021-P-033_1999			021-P-033	Port Saint Hubert	-1.973	48.535	1999
021-P-033_2000			021-P-033	Port Saint Hubert	-1.973	48.535	2000
021-P-033_2001	021	Rance - estuaire et large	021-P-033	Port Saint Hubert	-1.973	48.535	2001
021-P-033_2002			021-P-033	Port Saint Hubert	-1.973	48.535	2002
021-P-033_2003			021-P-033	Port Saint Hubert	-1.973	48.535	2003
021-P-033_2004			021-P-033	Port Saint Hubert	-1.973	48.535	2004
021-P-033_2009			021-P-033	Port Saint Hubert	-1.973	48.535	2009
021-P-033_2010			021-P-033	Port Saint Hubert	-1.973	48.535	2010
021-P-033_2011			021-P-033	Port Saint Hubert	-1.973	48.535	2011
032-P-001_1994	032	Baie de Lannion	032-P-001	Le Douron	-3.642	48.679	1994
034-P-001_1994			034-P-001	Pen al Lann	-3.894	48.665	1994
034-P-001_1995			034-P-001	Pen al Lann	-3.894	48.665	1995
034-P-005_1994			034-P-005	Locquenolé	-3.856	48.617	1994
034-P-005_1995	034	Rivière de Morlaix	034-P-005	Locquenolé	-3.856	48.617	1995
034-P-005_1996			034-P-005	Locquenolé	-3.856	48.617	1996
034-P-005_1998			034-P-005	Locquenolé	-3.856	48.617	1998
034-P-005_2013			034-P-005	Locquenolé	-3.856	48.617	2013
035-P-007_1994			035-P-007	Penzornou	-3.943	48.660	1994
035-P-007_1995	035	Penzé	035-P-007	Penzornou	-3.943	48.660	1995
035-P-007_1996			035-P-007	Penzornou	-3.943	48.660	1996
037-P-009_1995			037-P-009	Paluden	-4.522	48.589	1995
037-P-017_1995	037	Ouessant - Abers	037-P-017	Keramoal	-4.572	48.561	1995
039-P-068_2010			039-P-068	La pointe du Château	-4.319	48.335	2010
039-P-068_2012	039	Rade de Brest	039-P-068	La pointe du Château	-4.319	48.335	2012
039-P-068_2013			039-P-068	La pointe du Château	-4.319	48.335	2013
040-P-001_2002	040	Baie de Douarnenez	040-P-001	Kervel	-4.285	48.116	2002
065-P-001_2010			065-P-001	Kervoyal	-2.532	47.520	2010
065-P-002_2002	065	Estuaire de la Vilaine	065-P-002	Le Halguen	-2.492	47.502	2002
066-P-002_2002	066	Pen Bé	066-P-002	Merquel	-2.467	47.422	2002
068-P-001_2002	068	Traicts du Croisic	068-P-001	Le Croisic (a)	-2.514	47.300	2002
069-P-024_2010	069	Loire - large	069-P-024	Pointe St Gildas large	-2.268	47.135	2010
079-P-026_1997	079	Pertuis d'Antioche	079-P-026	Le Cornard	-1.131	46.055	1997
080-P-008_1997			080-P-008	Boyard	-1.208	45.969	1997
080-P-008_2003	080	Mareennes Oléron	080-P-008	Boyard	-1.208	45.969	2003

Tableau 4.1. Caractéristiques des séries temporelles sélectionnées pour l'analyse phénologique.

La figure 4.1 représente un résumé des valeurs des paramètres phénologiques obtenus. Le démarrage du bloom se situe entre le jour 70 et le jour 200 de l'année (soit entre avril et juillet). Le maximum d'abondance se situe entre le jour 147 et le jour 217 de l'année (soit entre fin mai et début août). Le jour de fin du bloom se situe entre les jours 160 et 330 de l'année (soit entre juin et début novembre). La durée totale de l'efflorescence varie entre 10 et 225 jours, avec des phases de croissance du bloom durant entre 4 et 120 jours et des phases de décroissance durant entre 4 et 161 jours. Le maximum d'abondance détecté dans ces séries temporelles atteint presque 8 millions de cellules  $L^{-1}$  et le minimum est de 10 000 cellules  $L^{-1}$  car c'est le critère d'abondance minimum pour sélectionner la série temporelle (c'est aussi le seuil sanitaire pour le risque de toxicité). Le taux de croissance se situe entre 0.06 et 2.39  $jour^{-1}$  et le taux de décroissance varie entre -0.07 et -2.60  $jour^{-1}$ .

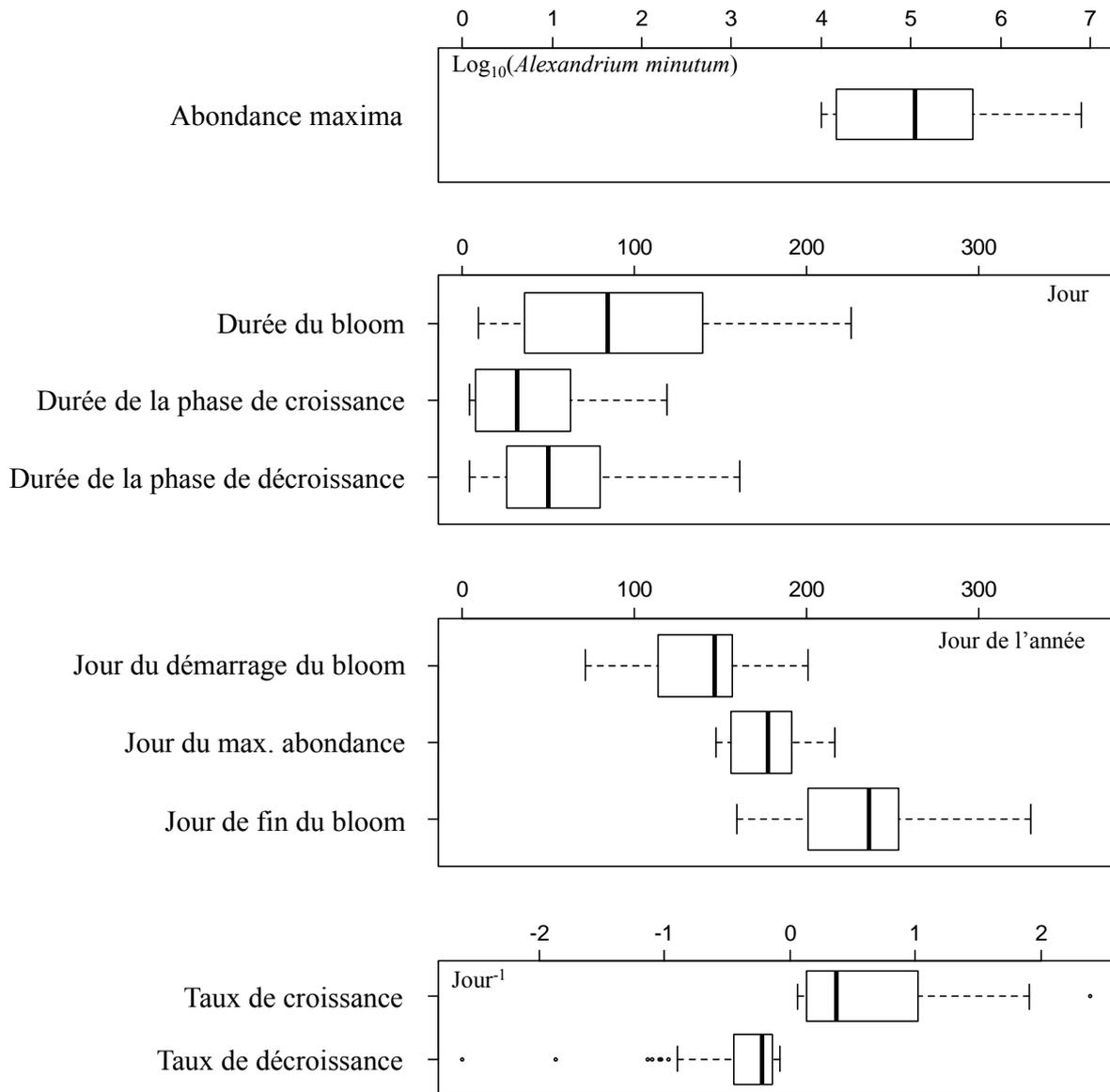


Figure 4.1. Résumé des paramètres phénologiques obtenus à partir des 37 séries temporelles annuelles.

Le tableau 4.2 montre les corrélations entre plusieurs paramètres et permet d'identifier des groupes de paramètres. Un groupe est constitué par les dates de démarrage et de fin du bloom et les paramètres qui concernent les durées des différentes phases du bloom. Un autre groupe concerne le taux et la durée de la phase de croissance et le taux et la durée de la phase de décroissance. L'abondance maximale et le jour du maximum d'abondance ne sont pas corrélés ou ont une corrélation faible avec les autres paramètres.

R	Jour du maximum d'abondance	Jour de démarrage du bloom	Jour de la fin du bloom
Jour du maximum d'abondance	1	0.31	0.43*
Jour de démarrage du bloom		1	-0.28
Jour de la fin du bloom			1
Abondance maximale			
Durée du bloom			
Durée de la phase de croissance			
Durée de la phase de décroissance			
Taux de croissance			
Taux de décroissance			

Tableau 4.2. Corrélations entre les paramètres phénologique des efflorescences d'*A. minutum*. (\*\*\*) p value < 0.001, (\*) p value < 0.01 et ( ) p value < 0.05.

R	Abondance maximale	Durée du bloom	Durée de la phase de croissance
Jour du maximum d'abondance	0.20	0.14	0.34
Jour de démarrage du bloom	0.09	-0.74**	-0.79**
Jour de la fin du bloom	0.12	0.86**	0.56**
Abondance maximale	1	0.03	0.04
Durée du bloom		1	0.82**
Durée de la phase de croissance			1
Durée de la phase de décroissance			
Taux de croissance			
Taux de décroissance			

R	Durée de la phase de décroissance	Taux de croissance	Taux de décroissance
Jour du maximum d'abondance	-0.07	-0.24	-0.04
Jour de démarrage du bloom	-0.48*	0.63**	-0.44*
Jour de la fin du bloom	0.87**	-0.44*	0.59**
Abondance maximale	0.02	0.24	-0.06
Durée du bloom	0.87**	-0.65**	0.65**
Durée de la phase de croissance	0.43*	-0.78**	0.42
Durée de la phase de décroissance	1	-0.35	0.67**
Taux de croissance		1	-0.40
Taux de décroissance			1

Tableau 4.2 (Cont.). Corrélations entre les paramètres phénologique des efflorescences *d'A. minutum*. (\*\*) p value < 0.001, (\*) p value < 0.01 et ( ) p value < 0.05.

### Relation des paramètres phénologiques avec l'environnement.

Après avoir réalisé une première exploration de la relation entre les données environnementales et les paramètres phénologiques, il ressort que la température de l'eau *in situ* au début de l'efflorescence a une influence prépondérante. Cette variable est très bien corrélée avec différents paramètres phénologiques comme la durée de l'efflorescence, les durées de la phase de croissance et de décroissance et aussi avec le taux de croissance (Tableau 4.3). L'irradiance au début de l'efflorescence présente aussi de bonnes corrélations avec ces mêmes paramètres.

R	Température démarrage	Irradiance démarrage
Durée du bloom	-0.89**	-0.68**
Durée de la phase de croissance	-0.91**	-0.73**
Durée de la phase décroissance	-0.69**	-0.45*
Taux croissance	0.69**	-0.46*
Taux décroissance	-0.59*	0.35

Tableau 4.3. Corrélations entre paramètres phénologiques, la température de l'eau et l'irradiance au moment du démarrage du bloom. (\*\*) p value < 0.001, (\*) p value < 0.01 et ( ) p value < 0.05.

L'index d'hiver de l'Oscillation Atlantique Multidécennale (OAM) calculé comme la moyenne des valeurs pendant les mois d'hiver (Décembre, Janvier et Février) présente une corrélation négative et significative avec le début de l'efflorescence (figure 4.2). Cet index est lié à des anomalies de pressions cycloniques et de précipitations dans la région Atlantique (Knight, Folland, & Scaife, 2006). Les deux phénomènes peuvent influencer par exemple l'évolution saisonnière de la stratification ou de la température de l'eau pendant les mois précédents les efflorescences *d'A. minutum*, et avancer ou retarder le jour de démarrage.

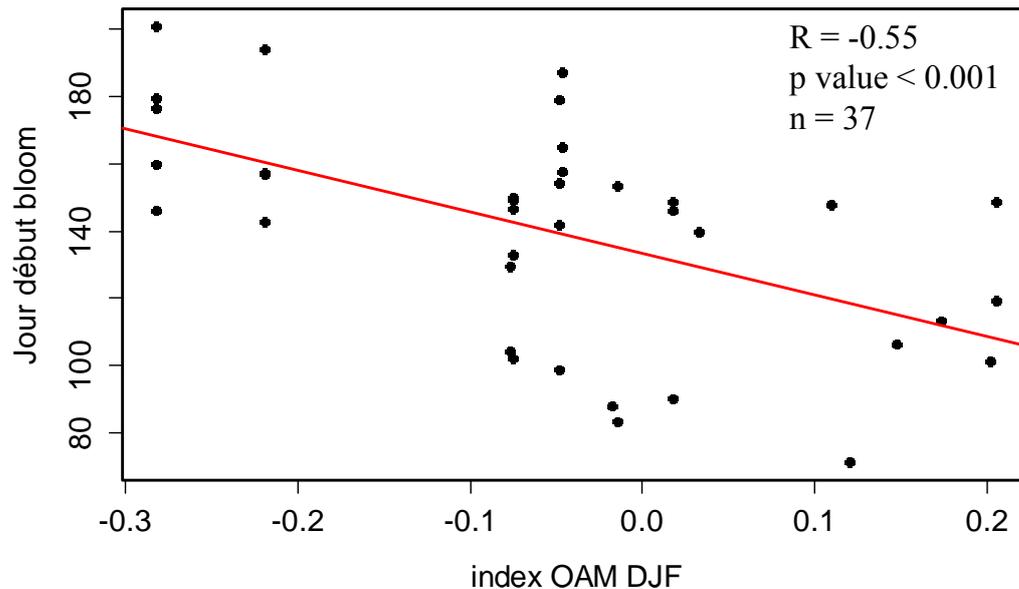


Figure 4.2. Relation entre le jour du démarrage du bloom et l'index d'hiver de l'Oscillation Atlantique Multidécennale (OAM DJF).

### Modèles de prédiction

A partir des connaissances obtenues jusqu'ici, il est possible de développer un modèle de prédiction pour le paramètre de la durée de la phase de croissance. Nous avons testé trois types de modèles différents: la régression linéaire, le modèle linéaire généralisé et le modèle d'arbre de régression. C'est ce dernier type de modèle, qui a donné le meilleur résultat, que nous présentons ici.

Pour le modèle d'arbre de régression, nous avons utilisé comme variables indépendantes la température de l'eau estimée par le satellite au début de l'efflorescence et l'Irradiance-Jour jusqu'au jour de démarrage du bloom. Ce modèle explique 78.7% de variabilité ( $R^2 = 0.79$ ,  $n = 37$ ; figure 4.3).

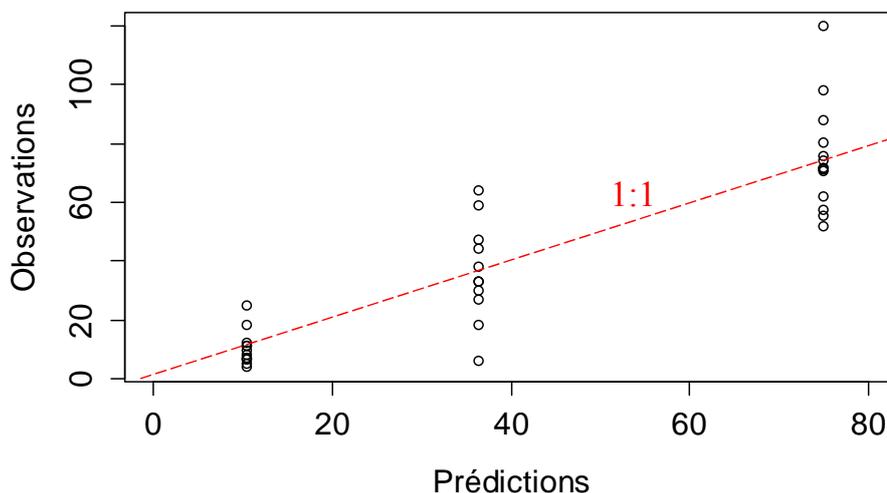


Figure 4.3. Résultat du modèle d'arbre de régression pour prédire la durée de la phase de croissance des efflorescences d'*A. minutum*.

Les décisions que ce modèle d'arbre de régression a défini sont montrées dans la figure 4.4. La première décision est le paramètre Irradiance-Jour à la valeur de  $16\ 134\ \text{Wm}^{-2}\ \text{Jour}$  qui permet une première division des données. Les données inférieures à ce critère ont une durée moyenne de la phase de croissance de 78.8 jours (14 données). Par contre, les données avec une mesure supérieure ou égale ont une durée moyenne de la phase de croissance de 22.8 jours (23 données). Ce dernier groupe est encore suffisamment grand pour conduire à une

autre division. Pour diviser ce groupe, le meilleur ajustement est obtenu avec une valeur seuil du paramètre de la température de l'eau au début du bloom de 13.75°C. Les données avec une mesure de température inférieure à cette valeur ont une durée moyenne de la phase de croissance de 36.4 jours (11 données). Par contre, les données avec une mesure de température supérieure ou égale à cette valeur ont une durée moyenne de la phase de croissance de 10.4 jours (12 données).

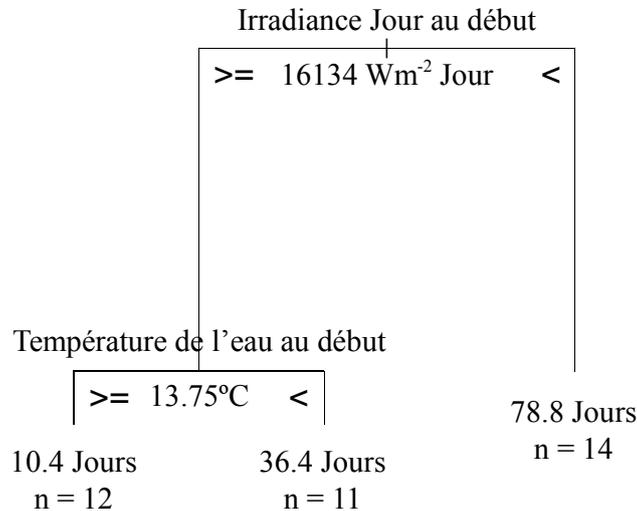


Figure 4.4. Représentation graphique des décisions du modèle de l'arbre de régression pour la prédiction de la durée de la phase de croissance des efflorescences d'*A. minutum*.

La figure 4.5a montre que le graphique des prédictions respecte les résidus des prédictions avec les valeurs observées. On remarque que les points se regroupent en trois groupes, correspondant aux trois groupes définis par le modèle d'arbre de régression. Ce comportement est normal dans ce type de modèle. On constate également que les résidus des prédictions sont quasi aléatoires. L'amplitude des résidus des valeurs les plus basses est inférieure aux autres. La figure 4.5b montre le graphique Q-Q des résidus des prédictions du modèle d'arbre de régression. La distribution des valeurs se détourne peu de la ligne définie comme une distribution normale.

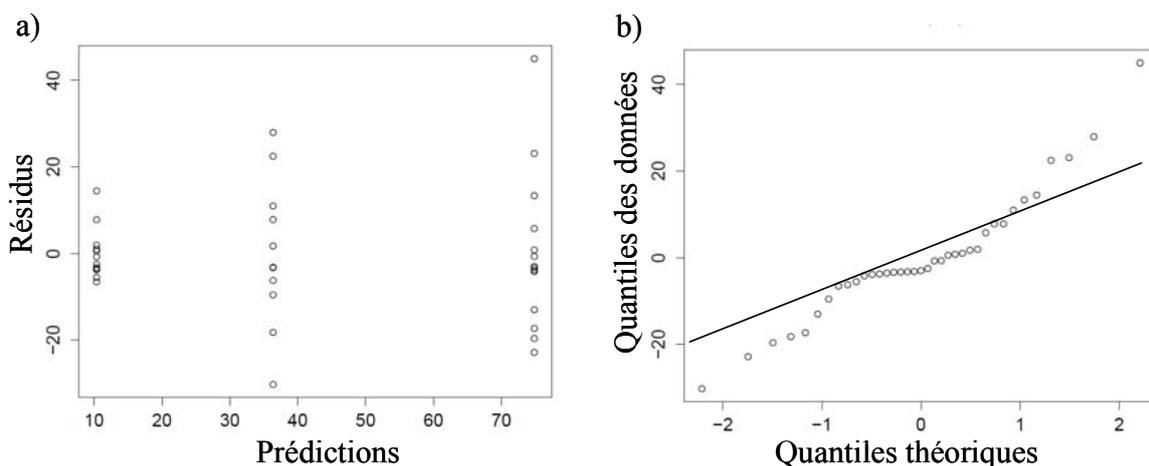


Figure 4.5. Représentation graphique des décisions du modèle de l'arbre de régression pour la prédiction de la durée de la phase de croissance des efflorescences d'*A. minutum*.

## Conclusion et perspectives

Le principal objectif de ce projet est de synthétiser les connaissances sur les efflorescences des microalgues toxiques le long des côtes françaises atlantiques à partir des données existantes et de construire des modèles de prédiction. Dans ce cadre, les espèces toxiques les plus problématiques pour cette région d'étude sont *A. minutum*, *Pseudo-nitzschia* spp. et *Dinophysis* spp. Ce rapport se limite à la première citée mais le travail de recueil des données et de développement des méthodes d'analyse facilitera l'application aux deux autres espèces.

Par rapport au plan de travail du projet Phytorisk, trois tâches ont été abordées. La *première tâche*, concernant l'identification et l'analyse des facteurs environnementaux et pressions anthropiques, est pratiquement achevée. Nous avons collecté les principales variables citées dans le projet comme les données hydrologiques du REPHY, les données du coefficient de marée, les indicateurs climatiques, les données satellitales, les données d'apports des bassins versants et finalement les résultats du modèle opérationnel côtier. Il reste à compléter ou substituer des variables qui ne sont pas très satisfaisantes, comme les nutriments en provenance des données REPHY et le coefficient de marée.

Concernant les nutriments, nous avons vu qu'il y a des valeurs manquantes pour pratiquement la totalité des données. Cela nous a incité à rechercher des données concernant les apports des bassins versants. Ces sont les débits des fleuves, le traceur simulé (résultat du modèle opérationnel) et le flux de nutriments (résultat des modèles statistiques). Les résultats des modèles opérationnel et statistique sont cependant uniquement disponibles pour les 10 dernières années et, pour les compléter, nous sommes en train d'acquérir les données de flux de nutriments dus aux fleuves de la région Bretagne depuis 1995 jusqu'au 2013. Ces données viennent du projet ECOFLUX, fondé dans le cadre d'un partenariat entre le Conseil général du Finistère et l'Institut Universitaire Européen de la Mer (<http://www-ium.univ-brest.fr/ecoflux>).

Le problème avec les données de coefficient de marée est que celui-ci a la même valeur pour toute la côte atlantique française, ce qui limite logiquement son utilisation pour des études locales. Pour contourner cette difficulté nous avons choisi d'utiliser le marnage, ce dernier étant particulier pour chaque station. Cette donnée est en cours d'acquisition.

Parmi les variables que nous avons incluses dans le tableau des données, quelques-unes concernent le même paramètre mesuré ou estimé de plusieurs façons (comme par exemple la température *in situ* et la température depuis le satellite) ou des variables qui traduisent le même processus (comme la salinité *in situ* et le traceur des fleuves). La comparaison systématique a permis de distinguer les particularités de chaque station ou région de la zone d'étude et de quelle façon elles peuvent influencer les résultats.

La *deuxième tâche* consiste à décrire et caractériser les efflorescences des microalgues toxiques. Une recherche bibliographique exhaustive et permis d'identifier les méthodologies applicables à nos données. Après avoir analysé les différentes méthodologies et les résultats que les auteurs ont obtenus, nous avons adopté la procédure développée par Rolinski et al. (2007). Nous avons obtenu des résultats satisfaisants qui ont permis de caractériser les efflorescences d'*A. minutum* avec 9 paramètres différents.

A partir de ces paramètres, nous avons pu analyser statistiquement les blooms d'*A. minutum* et les lier aux variables environnementales pour mieux comprendre leur dynamique. Cet objectif est l'objet de la *troisième tâche* du projet. Nous avons développé un premier modèle explicatif et prédictif de la durée de la phase de croissance de l'efflorescence avec un bon résultat. Ce modèle implique la température de l'eau et l'irradiance au début de l'efflorescence. Plusieurs travaux montrent que ces variables environnementales sont importantes pour différents processus physiologiques d'*A. minutum*. Par exemple, l'excystment et l'encystment liés aux processus de début et fin de l'efflorescence respectivement, ou le taux de croissance (Projet-FINAL 2008).

Par la suite, nous comptons développer d'autres modèles pour les paramètres phénologiques des efflorescences d'*A. minutum* restant, en utilisant aussi les nouvelles variables environnementales citées auparavant. Un des paramètres plus intéressants est l'abondance maximale du bloom, car il est lié à la contamination des coquillages (Chapelle et al., 2007). Cette information est très importante pour les professionnels du secteur conchylicole. Nous avons également commencé à aborder la définition de la niche écologique, en appliquant à nos données la méthodologie développée dans la thèse en cours de T. Hernández-Fariñas. Enfin, la prochaine étape verra aussi l'application de ces approches aux autres espèces de microalgues toxiques (*Pseudo-nitzschia* spp. et *Dinophysis* spp.), en utilisant les mêmes jeux de données environnementales.

Jusqu'à maintenant, les étapes présentées dans ce rapport suivent le plan de travail prévu dans le projet. Certains résultats ont fait l'objet d'une communication orale à un colloque international en octobre 2014

(Colloque du CIEM, La Corogne, Espagne). Les conclusions préliminaires sont encourageantes pour la suite du projet Phytorisk.

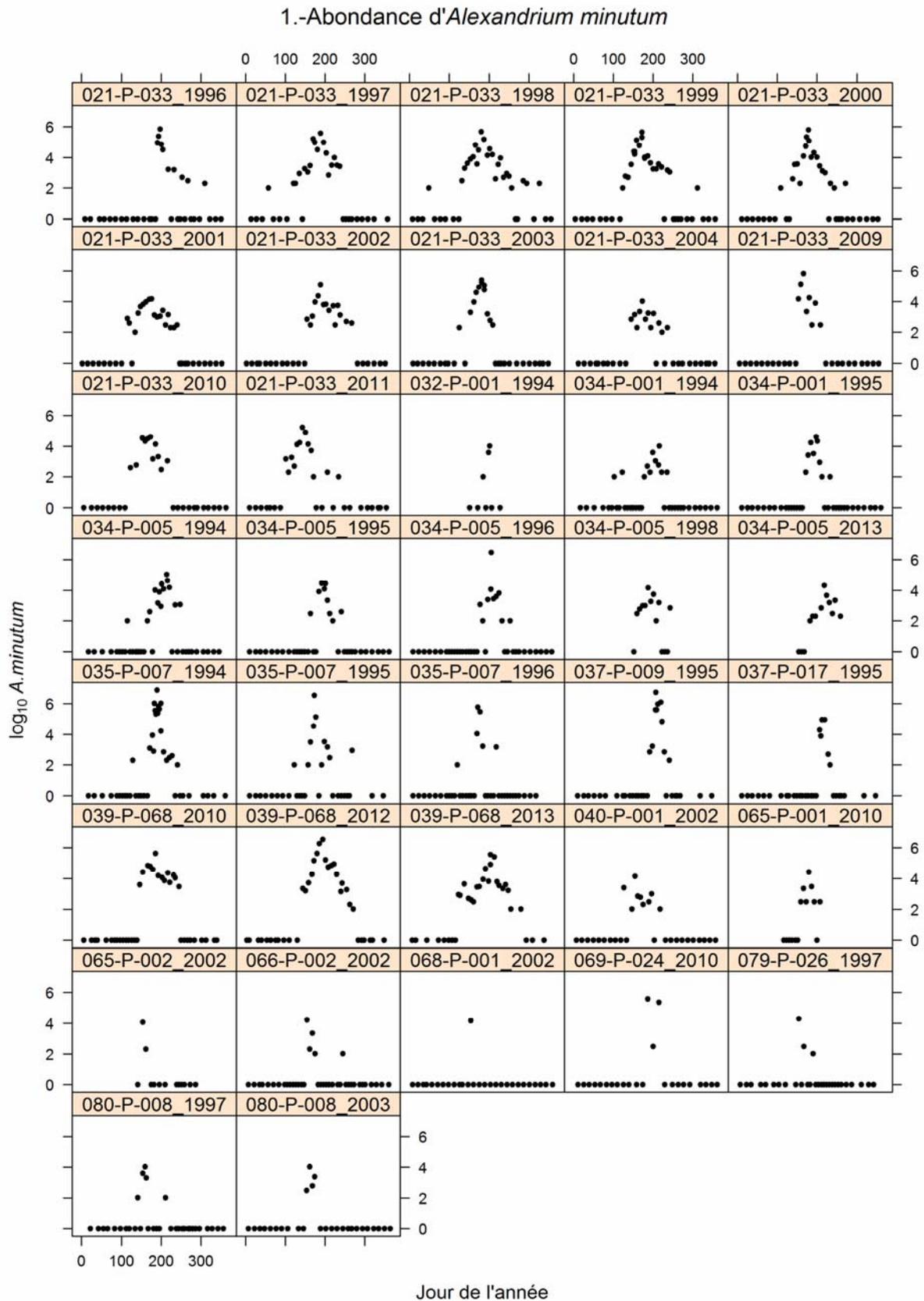
## Références

- Beliaeff, B., Gros, P., Belin, C., Raffin, B., Gailhard, I., & Durbec, J.-P. (2001). “Phytoplankton events” in French coastal waters during 1987–1997. *Oceanologica Acta*, 24(5), 425–433. doi:10.1016/S0399-1784(01)01156-2
- Bolch, C. J., Blackburn, S. I., Cannon, J. a., & Hallegraeff, G. M. (1991). The resting cyst of the red-tide dinoflagellate *Alexandrium minutum* (Dinophyceae). *Phycologia*, 30(2), 215–219. doi:10.2216/i0031-8884-30-2-215.1
- Bonhomme, R. (2000). Bases and limits to using “degree.day” units. *European Journal of Agronomy*, 13, 1–10. doi:10.1016/S1161-0301(00)00058-7
- Cassou, C. (2008). Intraseasonal interaction between the Madden-Julian Oscillation and the North Atlantic Oscillation. *Nature*, 455(7212), 523–7. doi:10.1038/nature07286
- Chambouvet, A., Morin, P., Marie, D., & Guillou, L. (2008). Control of toxic marine dinoflagellate blooms by serial parasitic killers. *Science (New York, N.Y.)*, 322(5905), 1254–7. doi:10.1126/science.1164387
- Chang, F. H., MacKenzie, L., Till, D., Hannah, D., & Rhodes, L. (1995). The first toxic shellfish outbreaks and the associated phytoplankton blooms in early 1993 in New Zealand. *LAVOISIER, PARIS(FRANCE)*, 145–150.
- Chapelle, A., Andrieux, F., Fauchot, J., Guillaud, J. F., Labry, C., Sourisseau, M., & Verney, R. (2007). *Comprendre, Prédire et Agir sur les efflorescences toxiques. Jusqu’où peut-on aller aujourd’hui dans le cas d’Alexandrium minutum en Penzé ?* (p. 13).
- Dijkstra, H. a., te Raa, L., Schmeits, M., & Gerrits, J. (2006). On the physics of the Atlantic Multidecadal Oscillation. *Ocean Dynamics*, 56(1), 36–50. doi:10.1007/s10236-005-0043-0
- Halim, Y. (1960). *Alexandrium minutum*, nov. gen. nov. sp. dinoflagellé induisant des eaux rouges. *Vie et Milieu*, 11, 102–105.
- Hurrell, J. W. (1995). Decadal trends in the north atlantic oscillation: regional temperatures and precipitation. *Science (New York, N.Y.)*, 269(5224), 676–9. doi:10.1126/science.269.5224.676
- Hutchinson, G. E. (1957). Concluding Remarks. *Cold Spring Harbor Symposium on Quantitative Biology*, 22, 415–427.
- Irigoien, X., Harris, R. P., Head, R. N., & Harbour, D. (2000). North Atlantic Oscillation and spring bloom phytoplankton composition in the English Channel. *Journal of Plankton Research*, 22(12), 2367–2371.
- Ji, R., Edwards, M., Mackas, D. L., Runge, J. a., & Thomas, A. C. (2010). Marine plankton phenology and life history in a changing climate: current research and future directions. *Journal of Plankton Research*, 32(10), 1355–1368. doi:10.1093/plankt/fbq062
- Knight, J. R., Folland, C. K., & Scaife, A. a. (2006). Climate impacts of the Atlantic Multidecadal Oscillation. *Geophysical Research Letters*, 33(17), L17706. doi:10.1029/2006GL026242
- Lieth, H. (1970). Phenology in productivity studies. In *Analysis of temperate forest ecosystems* (pp. 29–46). Springer.
- Ménesguen, A., & Dussauze, M. (2014). *Détermination des “ bassins récepteurs ” marins des principaux fleuves français de la façade Manche-Atlantique , et de leurs rôles respectifs dans l ’ eutrophisation des masses d ’ eau DCE et des sous-régions DCSMM.* (p. 230).
- Morin, P., Erard-Le Denn, E., Maguer, J. F., Madec, C., Videau, C., Le Grand, J., & Macé, E. (2000). *Etude des causes de prolifération de microalgues toxiques en mer: Cas d’Alexandrium* (p. 135).
- Nehring, S. (1994). First living *Alexandrium minutum* resting cysts in Western Baltic. *Harmful Algae News*, 9, 1–2.

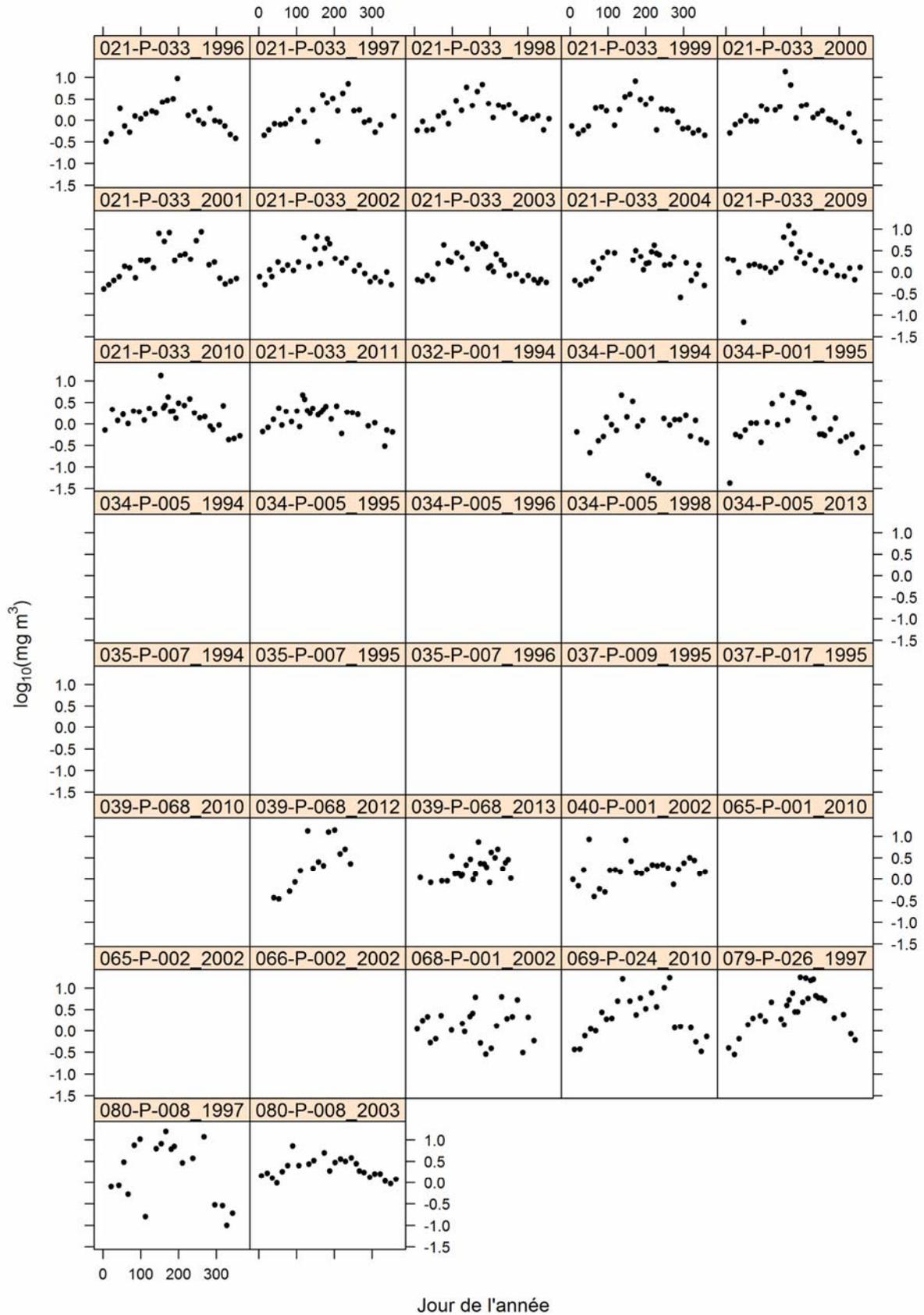
- Projet-FINAL. (2008). *Forecasting the initiation of Harmful Algal Blooms. Ecophysiological models of Alexandrium and Pseudo-nitzschia (Workpackage 3: Deliverable 7)* (p. 27).
- Rolinski, S., Horn, H., Petzoldt, T., & Paul, L. (2007). Identifying cardinal dates in phytoplankton time series to enable the analysis of long-term trends. *Oecologia*, *153*(4), 997–1008. doi:10.1007/s00442-007-0783-2
- Siegel, D. A., Doney, S. A., & Yoder, J. A. (2002). The North Atlantic Spring Phytoplankton Bloom and Sverdrup's Critical Depth Hypothesis, *296*, 730–734.
- Van Vliet, A. J. H., & De Groot, R. S. (2003). Towards an operational system for monitoring, modelling and forecasting of phenological changes and their socio-economic impact. In *Challenging times* (p. 155). Wageningen, The Netherlands.
- Weyhenmeyer, G. A., Blenckner, T., & Pettersson, K. (1999). Changes of the plankton spring outburst related to the North Atlantic Oscillation. *Limnology and Oceanography*, *44*(7), 1788–1792.

## Annexe I

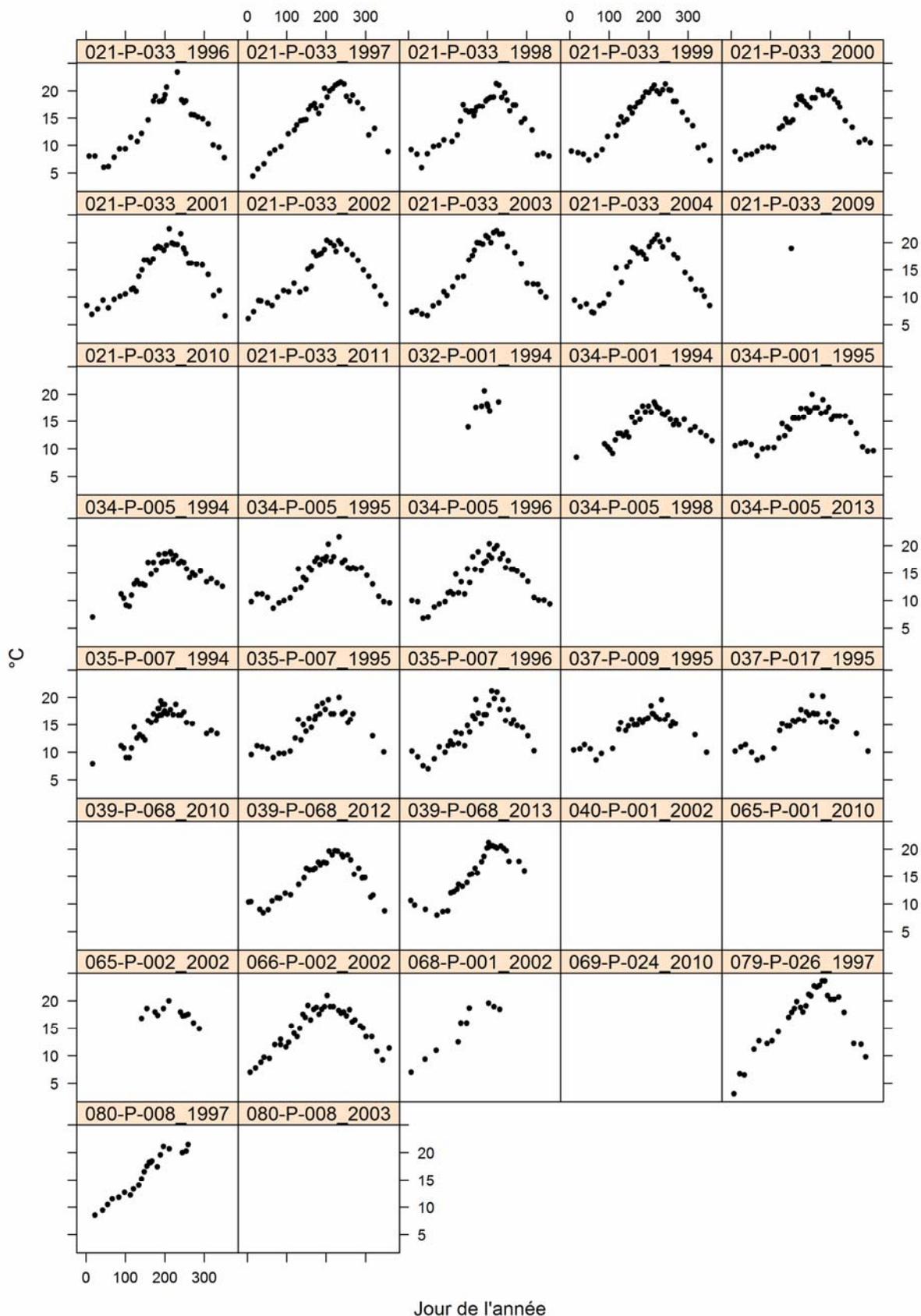
Représentation graphique des différents descripteurs environnementaux pour les années et les stations concernant l'étude phénologique.



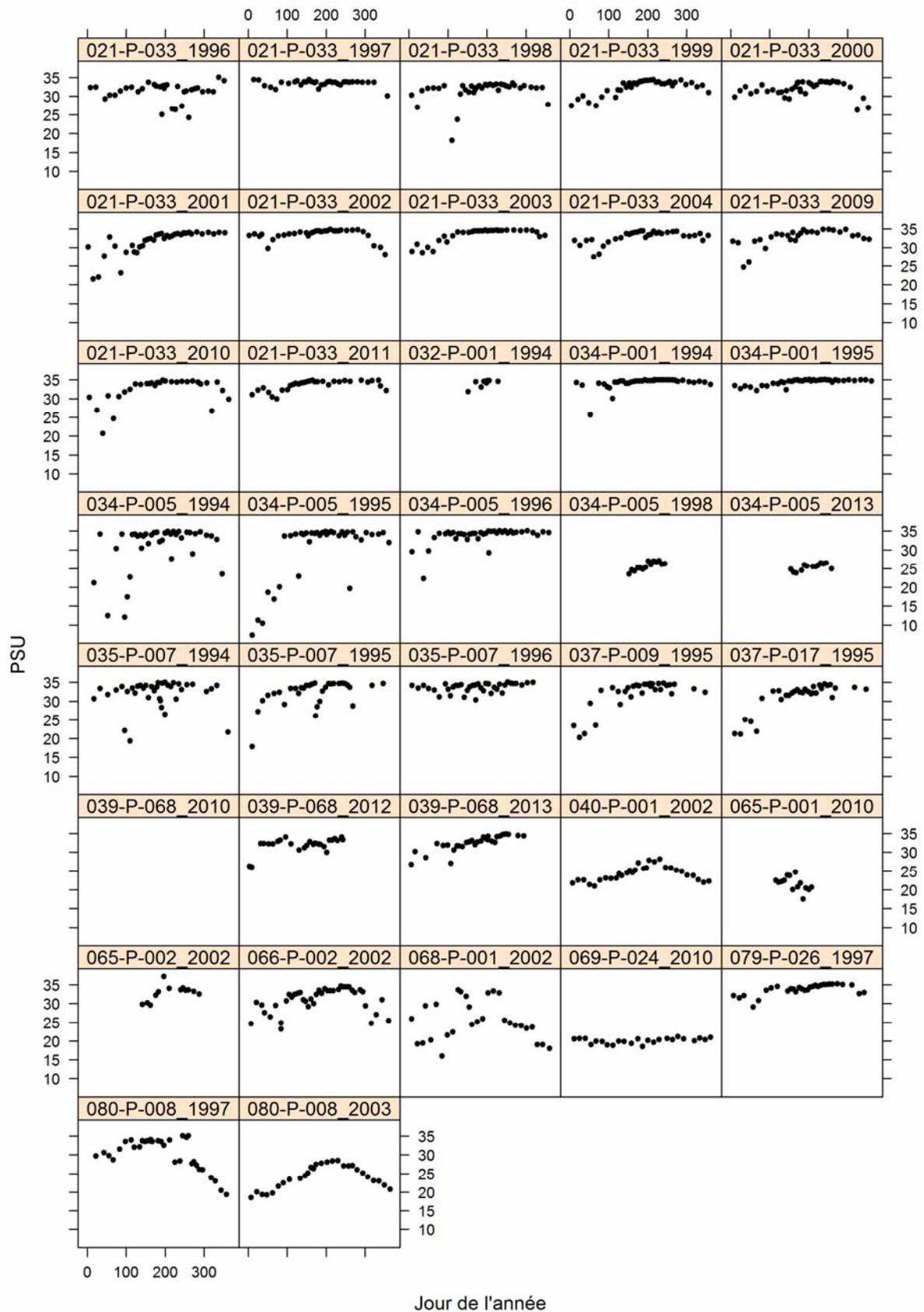
## 2.-Chlorophylle



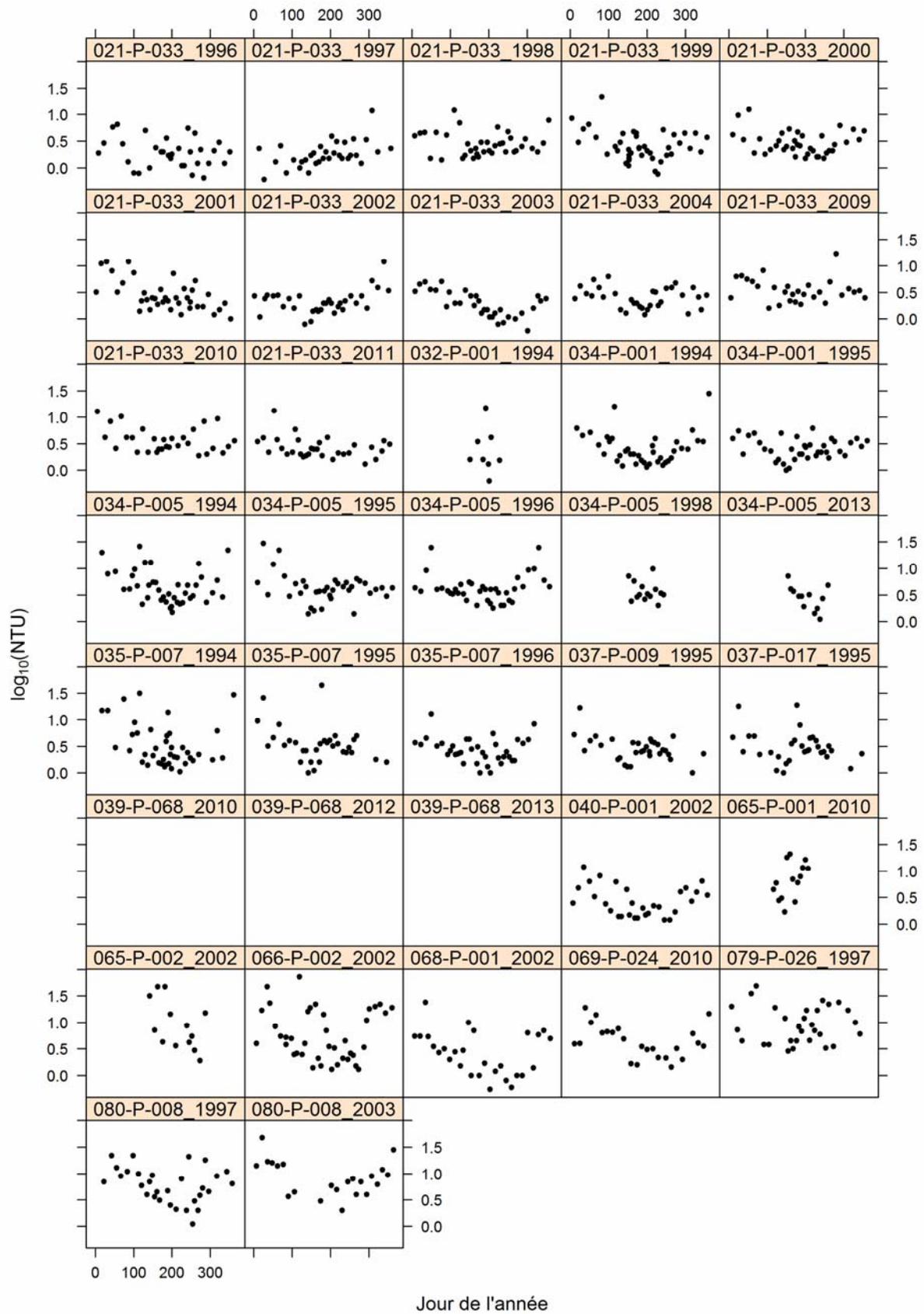
### 3.-Température



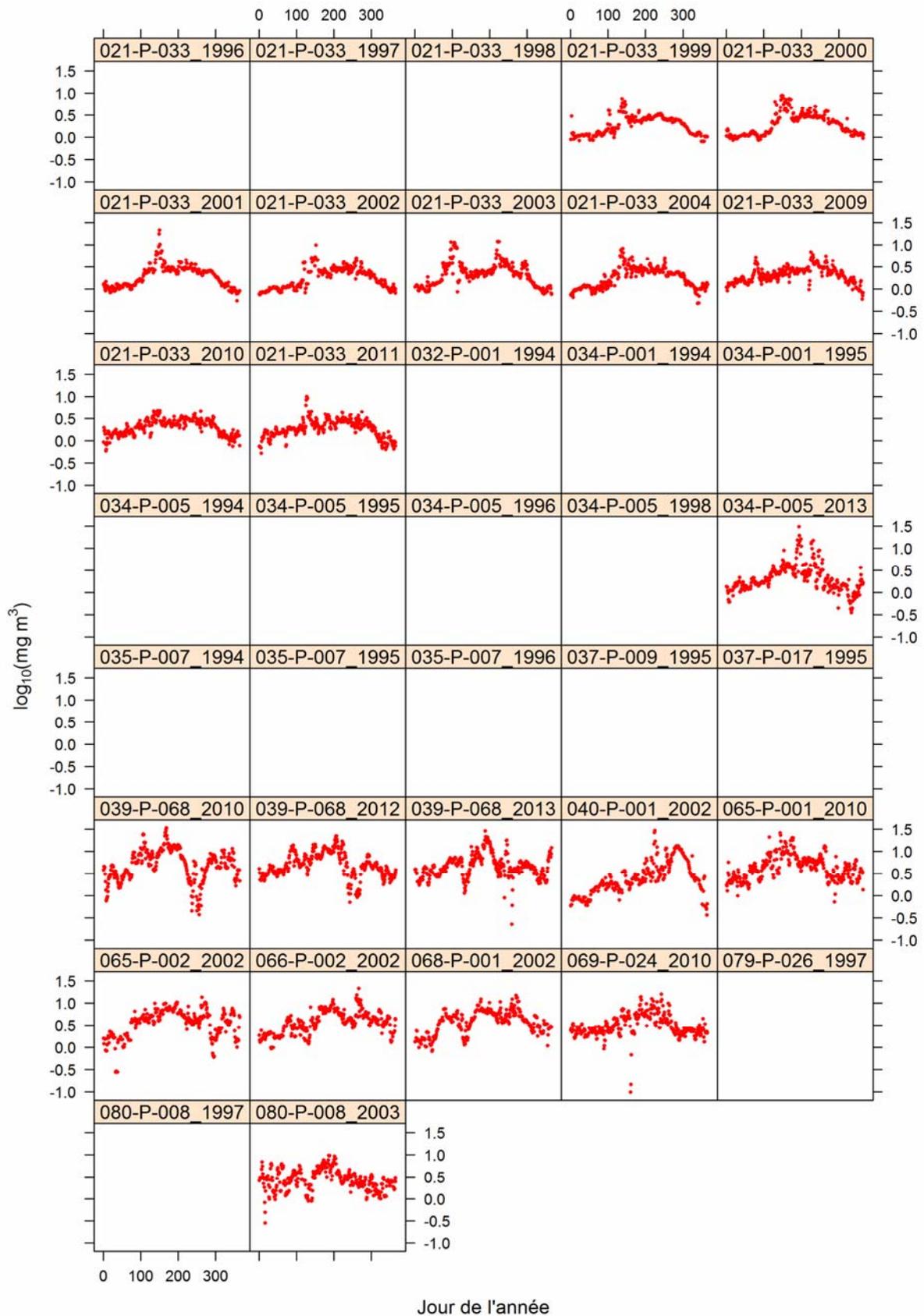
### 4.-Salinité



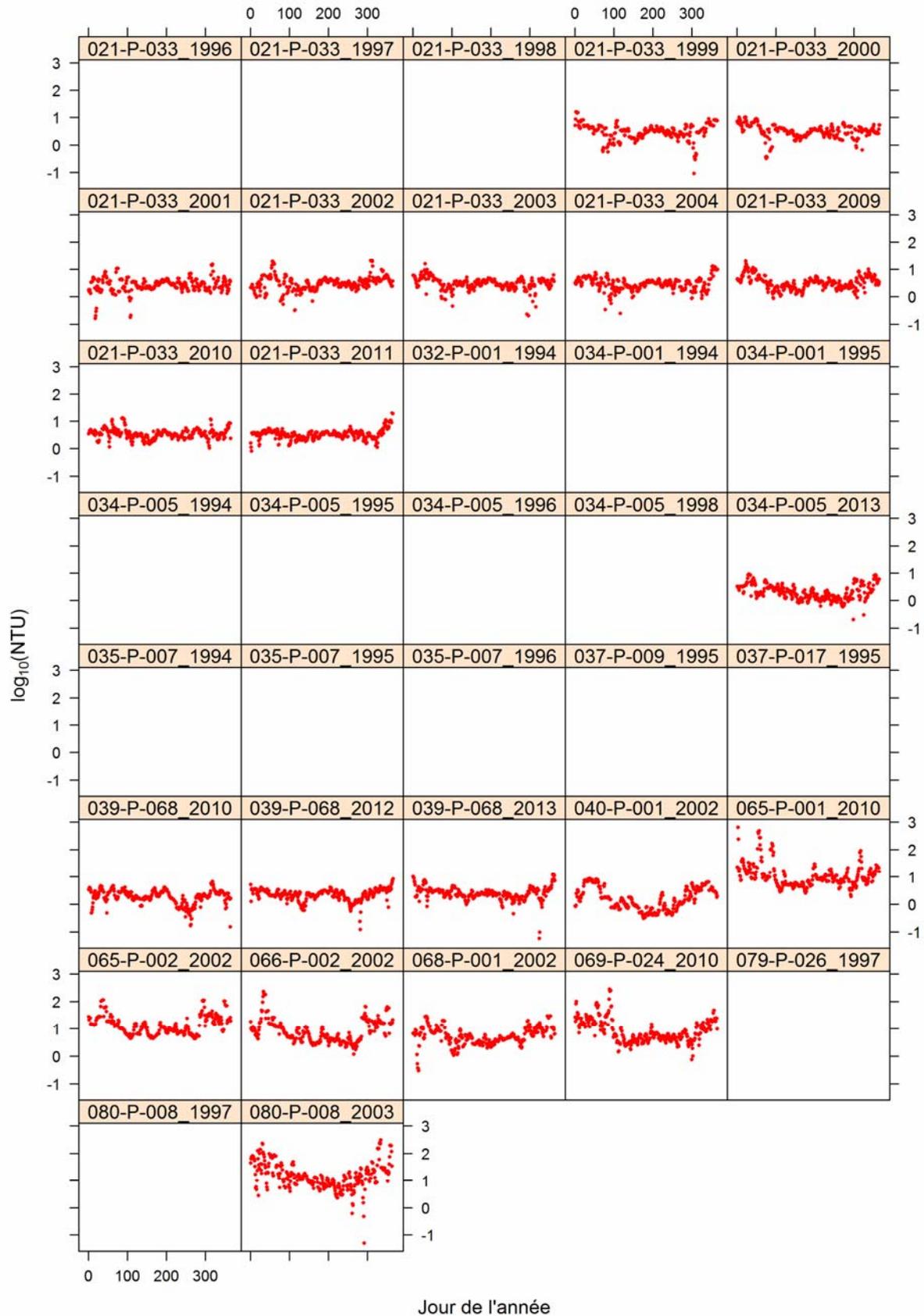
## 5.-Turbidité



## 6.-Chlorophylle en Surface de la Mer (Téledétection)



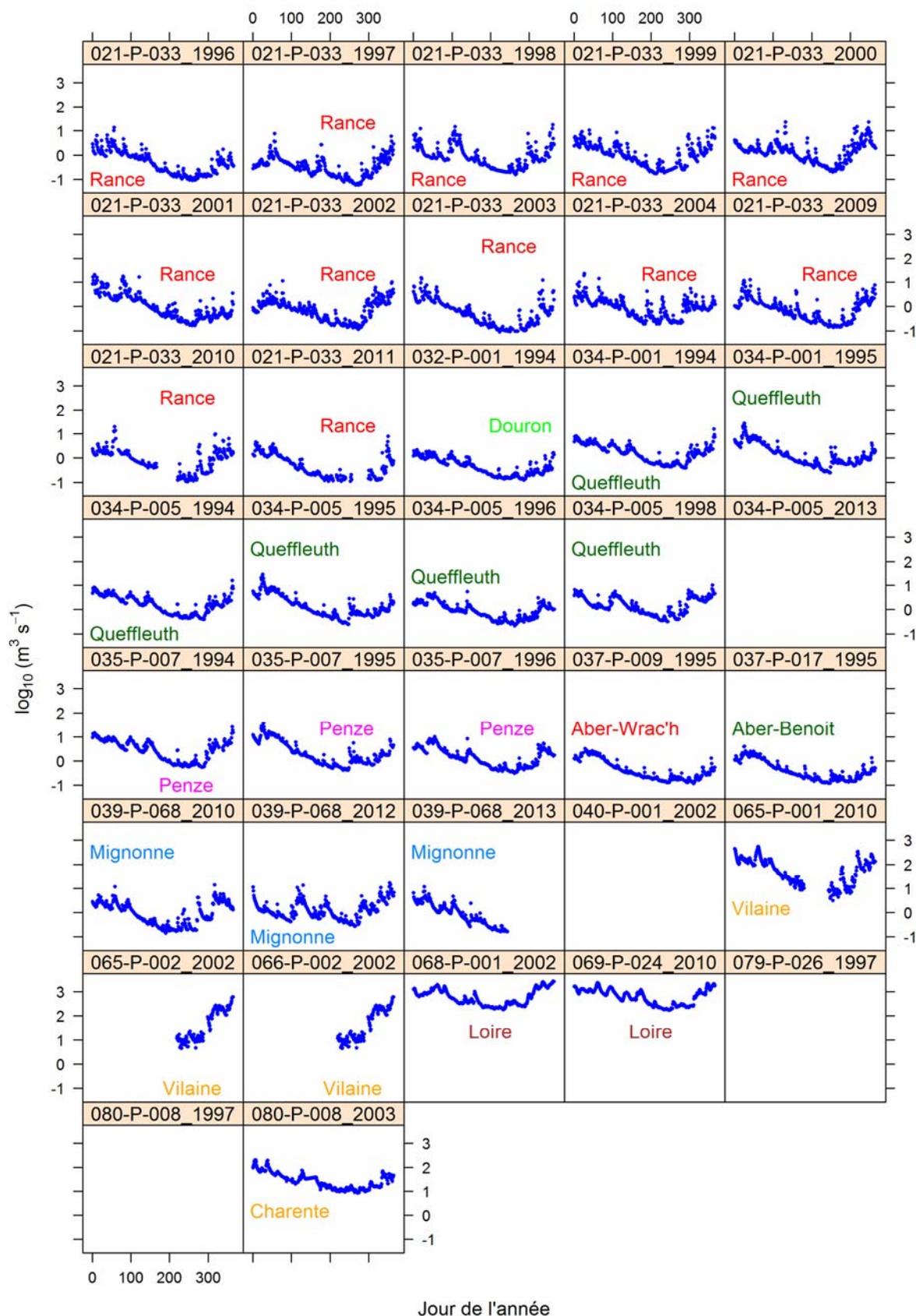
## 7.-Matière inorganique en suspension Surface de la Mer (Téledétection)



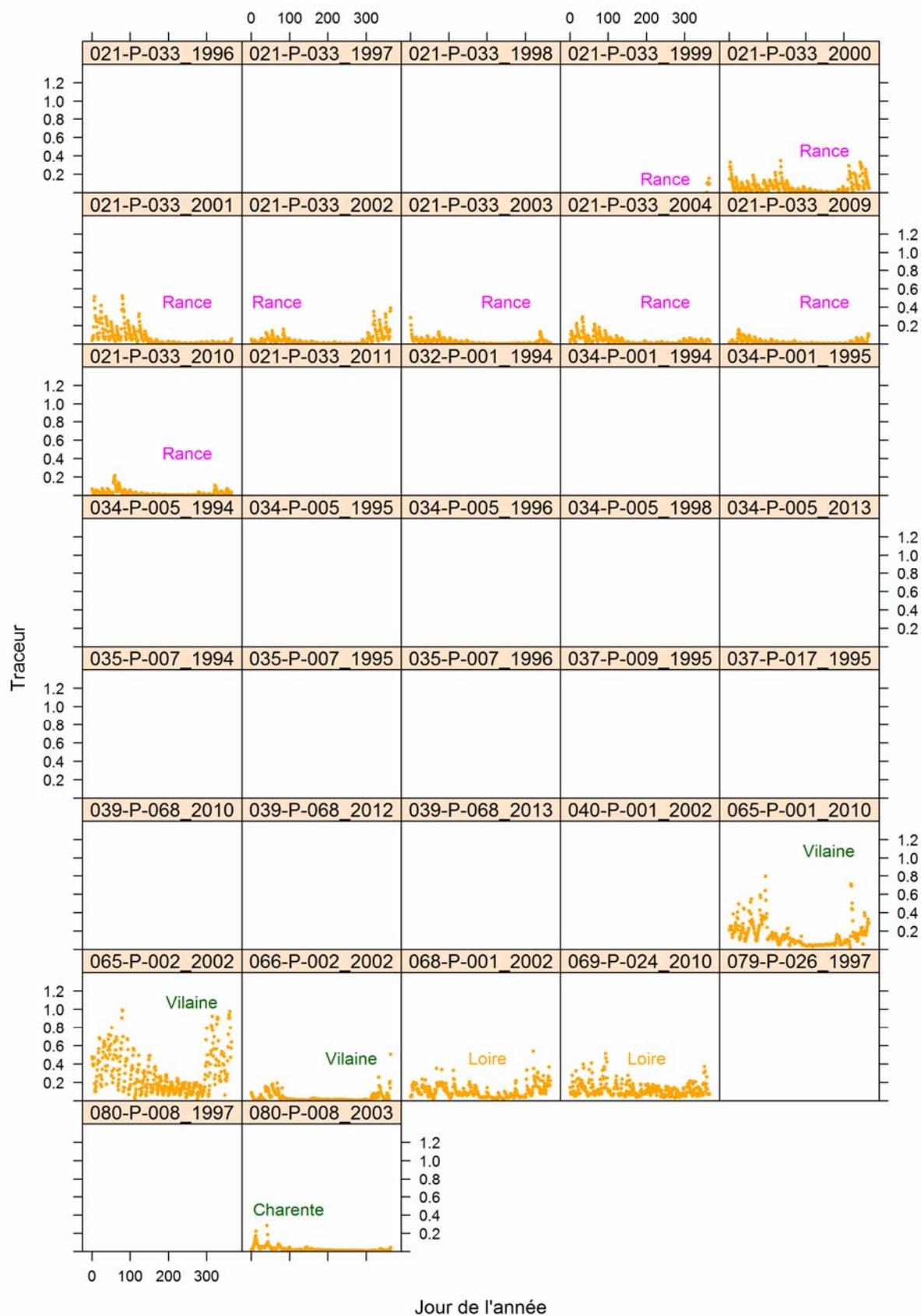




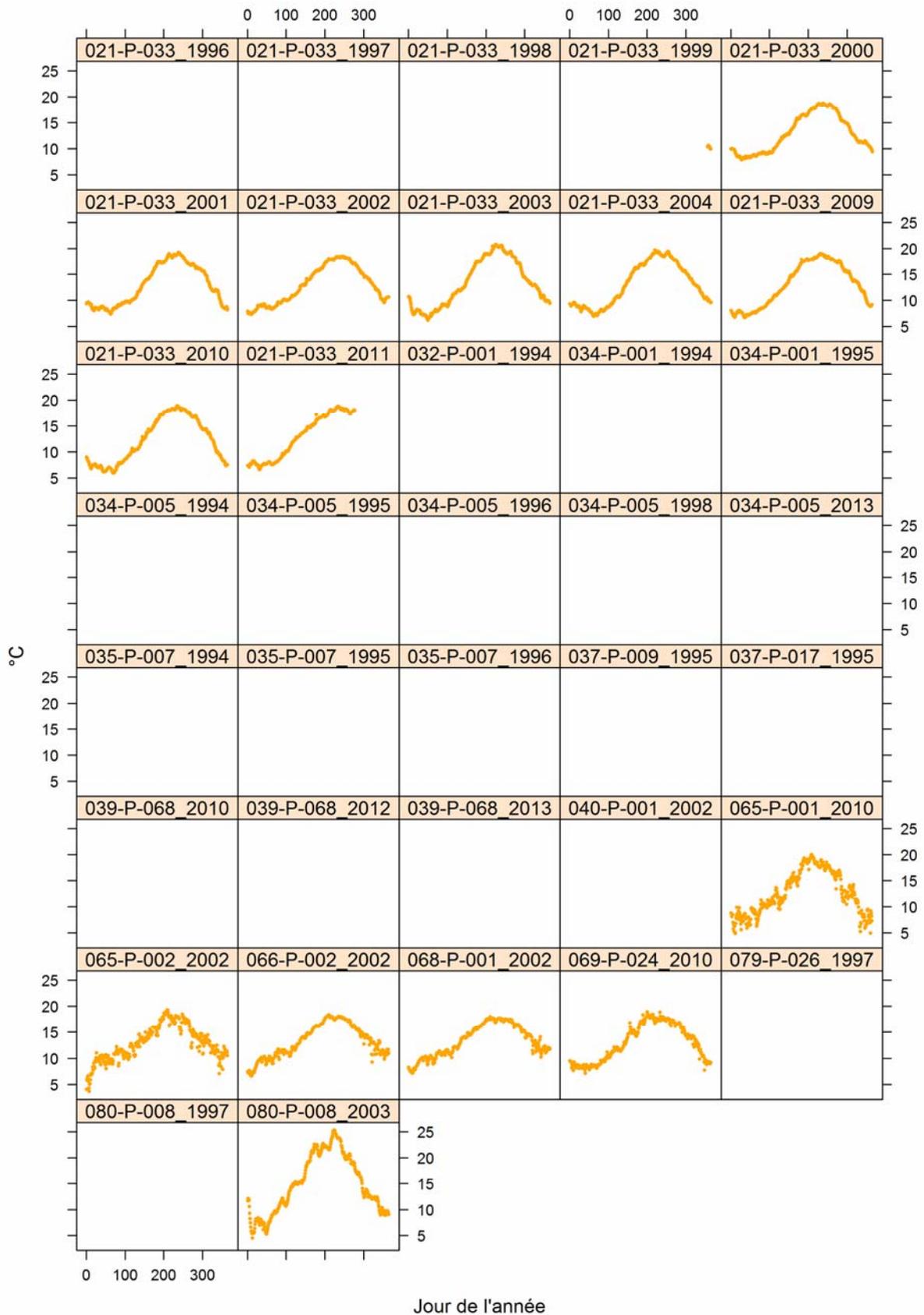
### 10.-Débit rivière



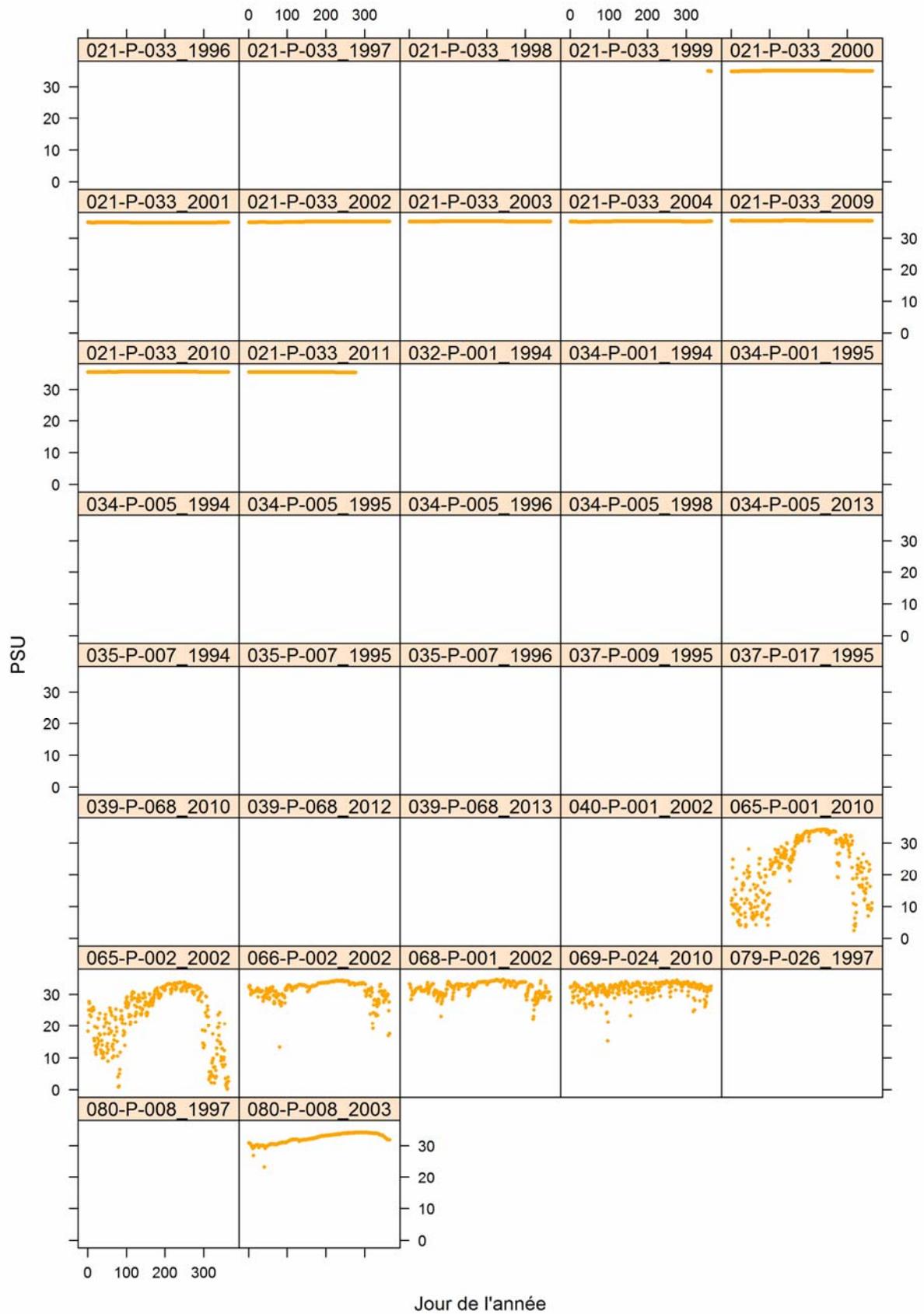
# 11.-Traceur



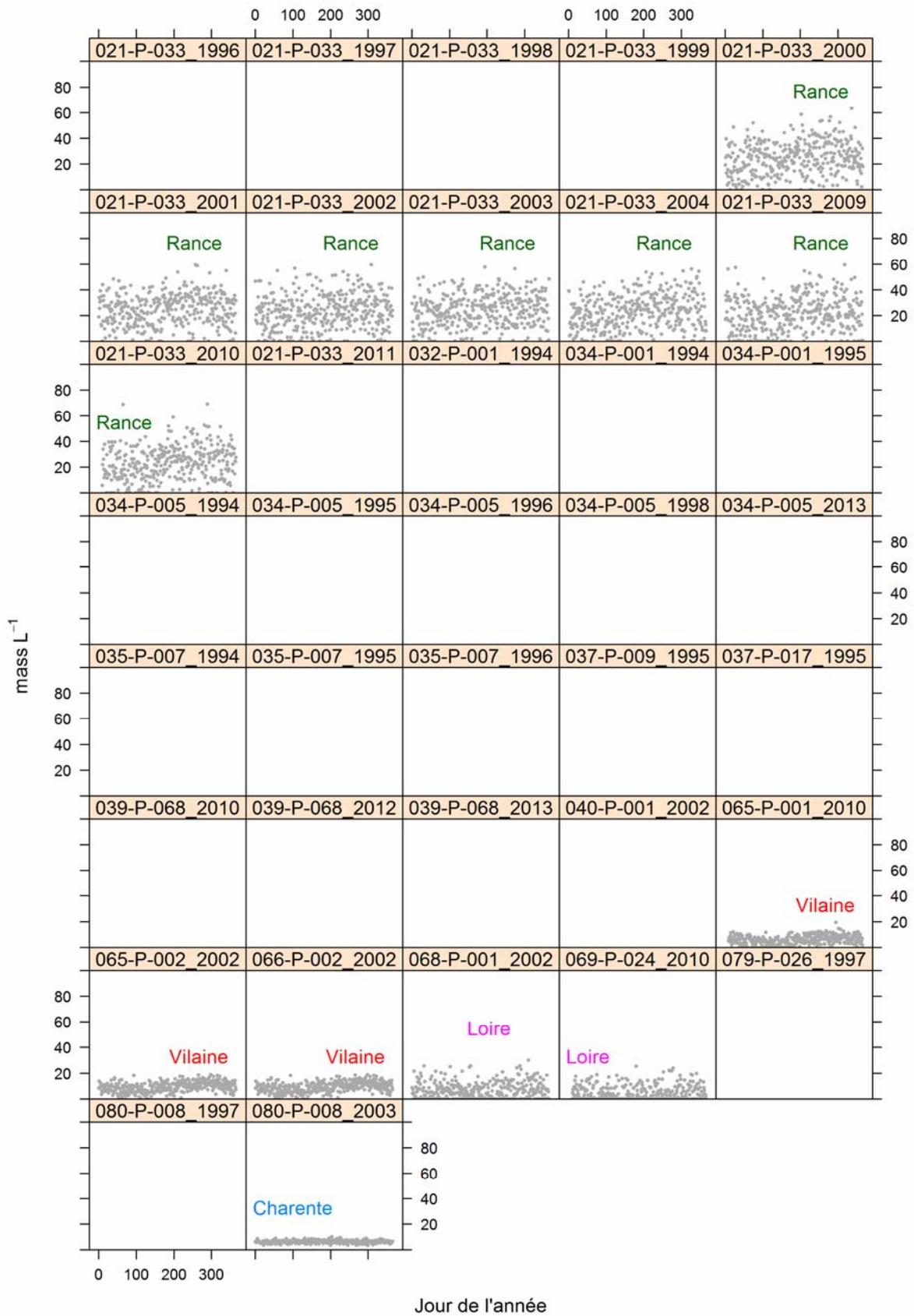
## 12.-Température (Modèle)



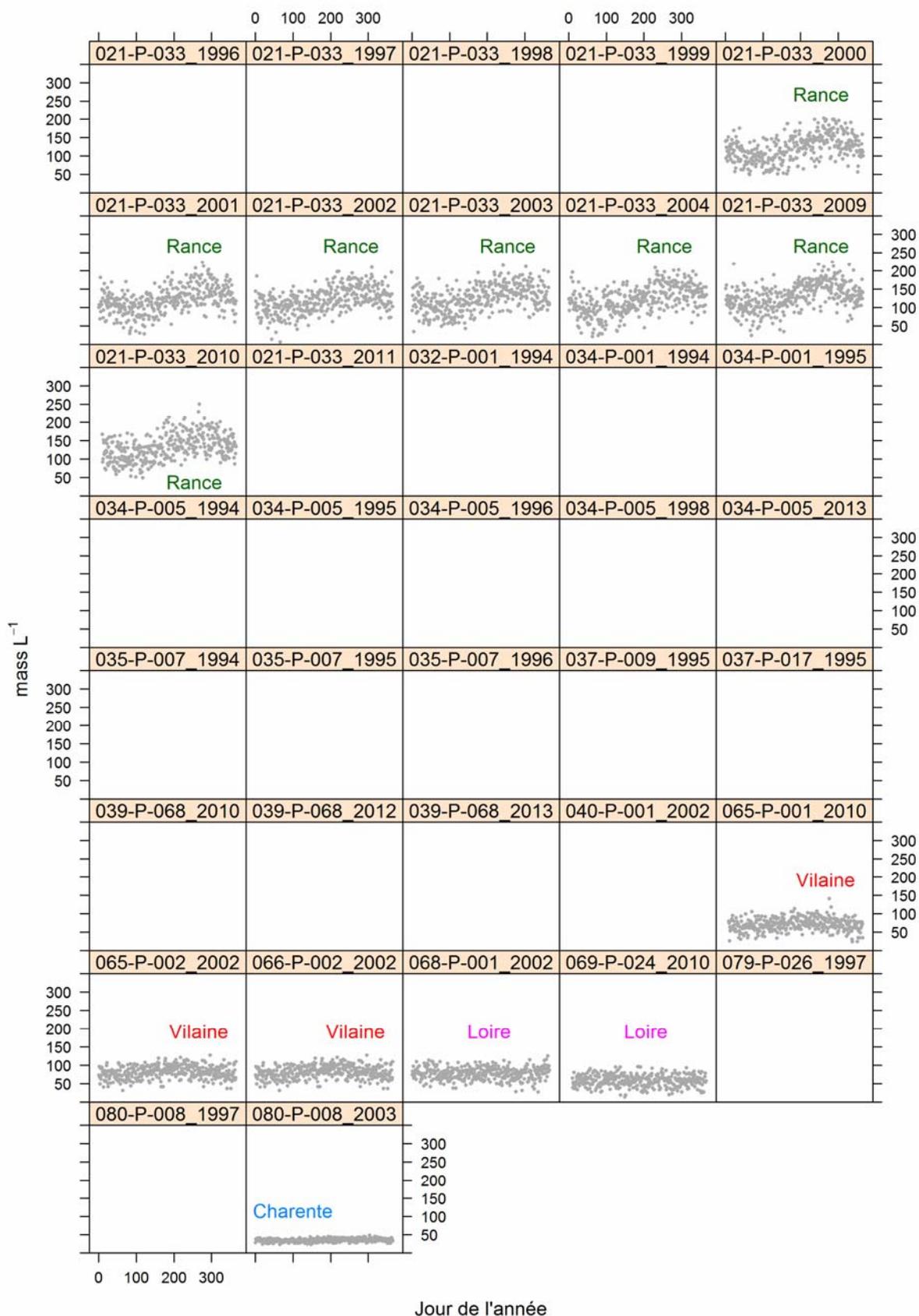
### 13.-Salinité (Modèle)



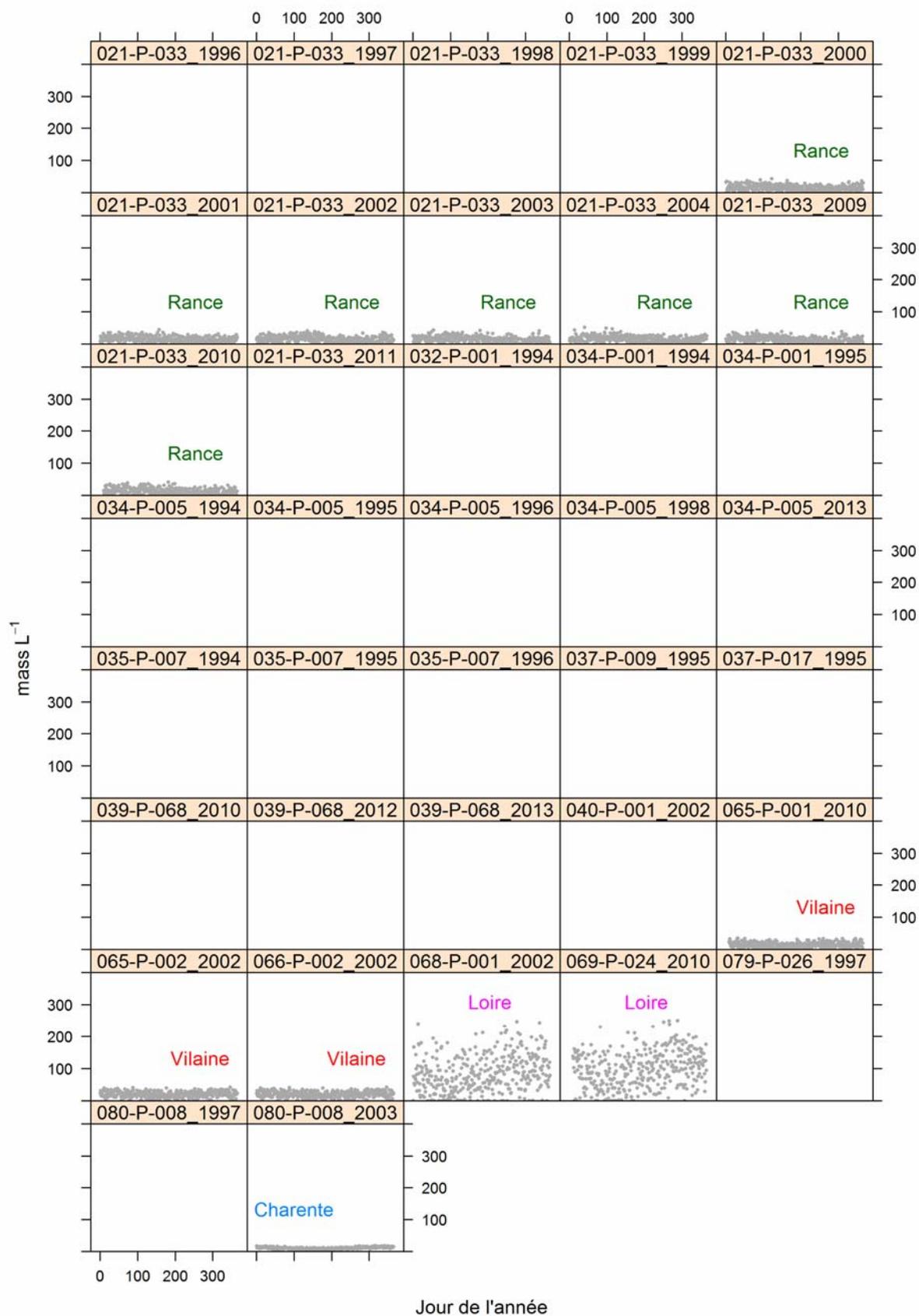
### 14.-Ammonium (Modèle)



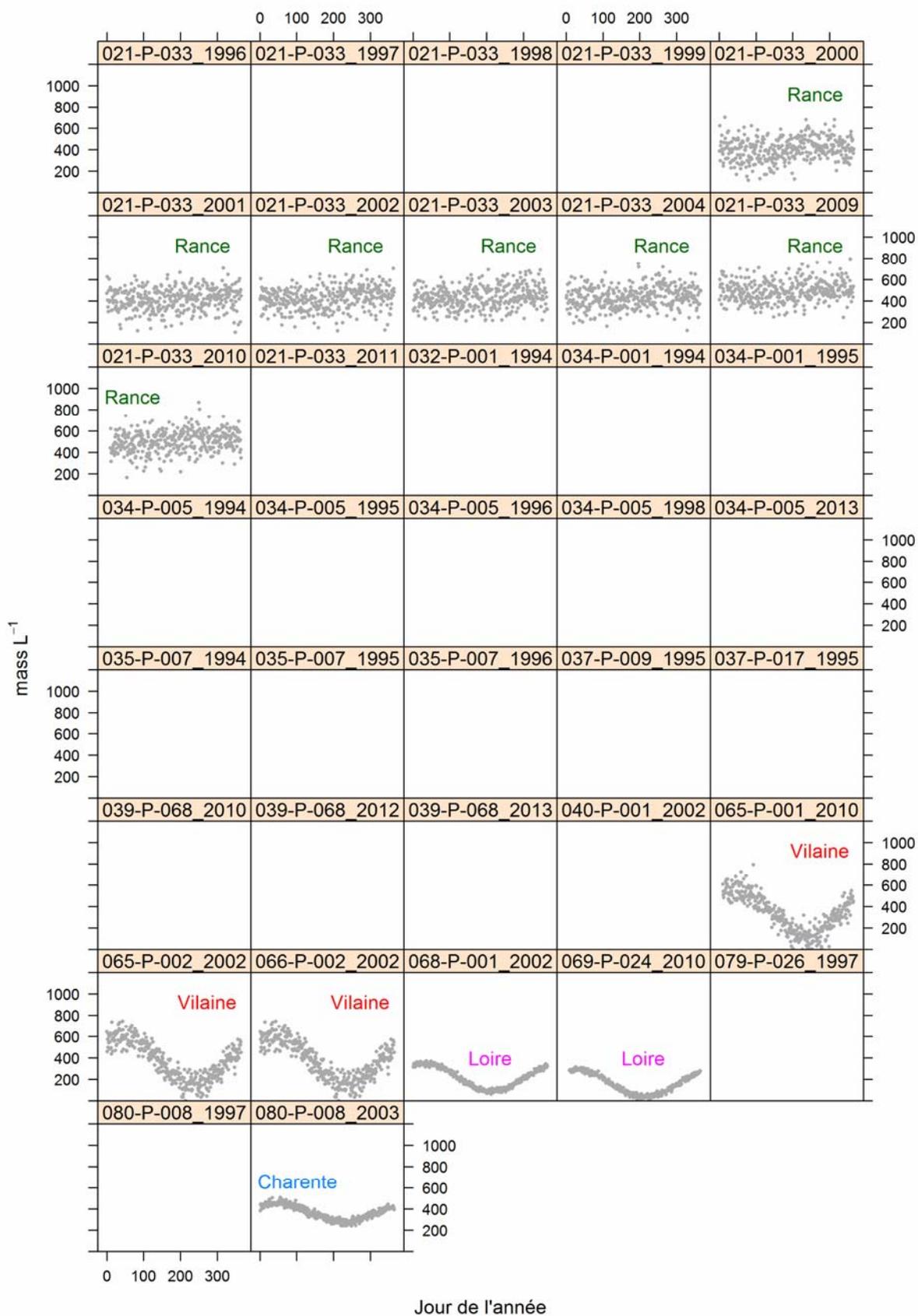
### 15.-Azote organique (Modèle)



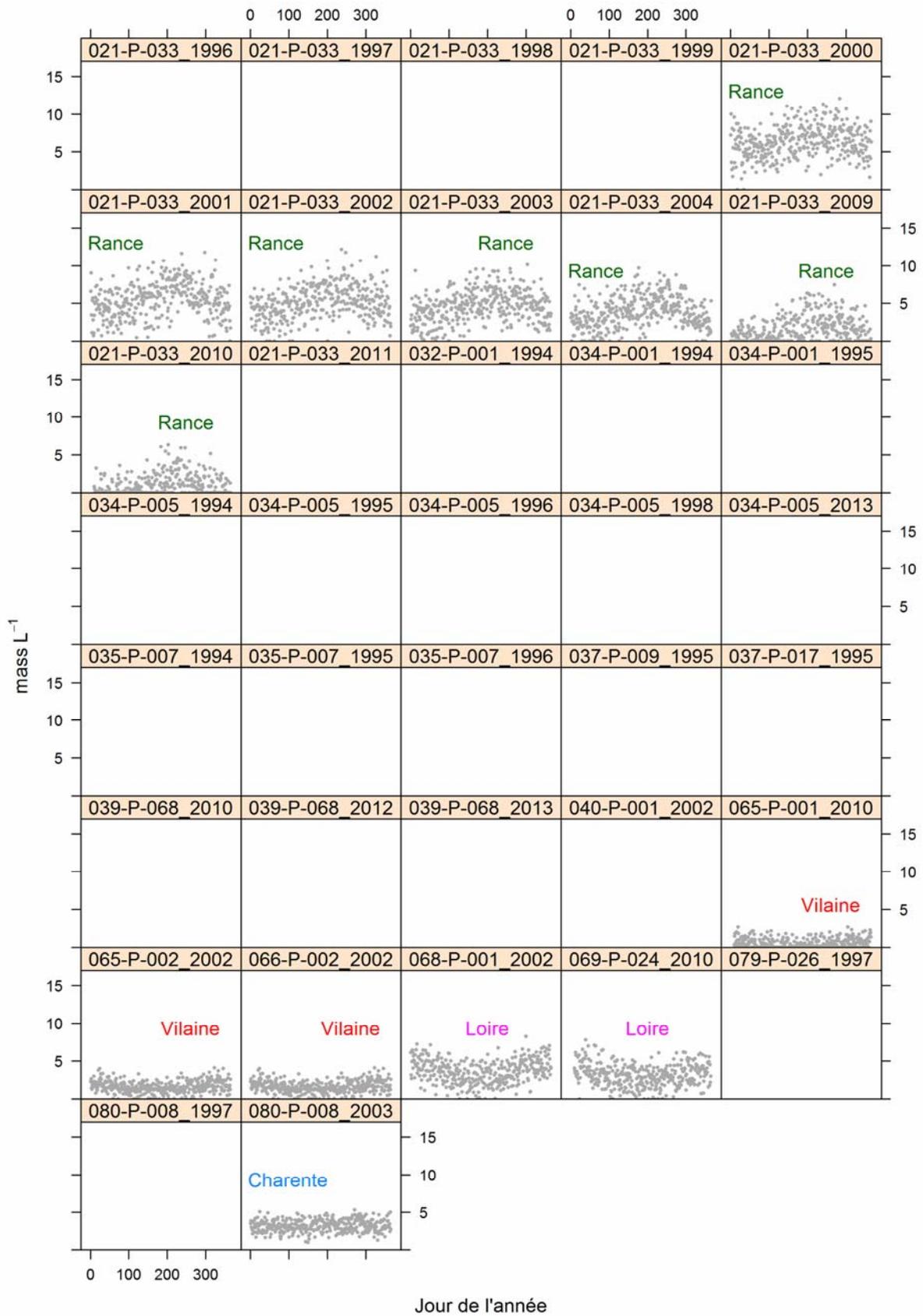
### 16.-Matières en suspension (Modèle)



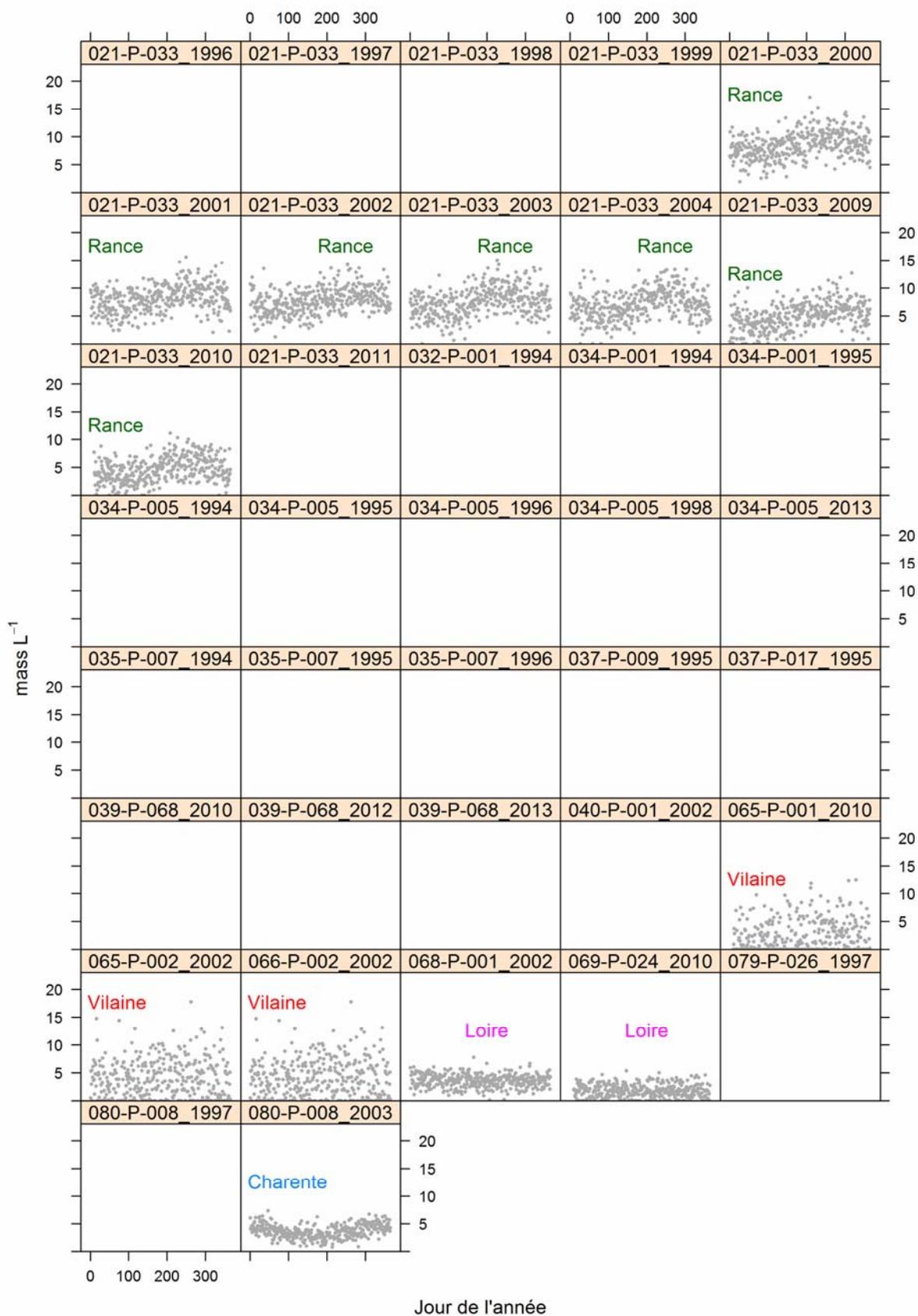
### 17.-Nitrate (Modèle)



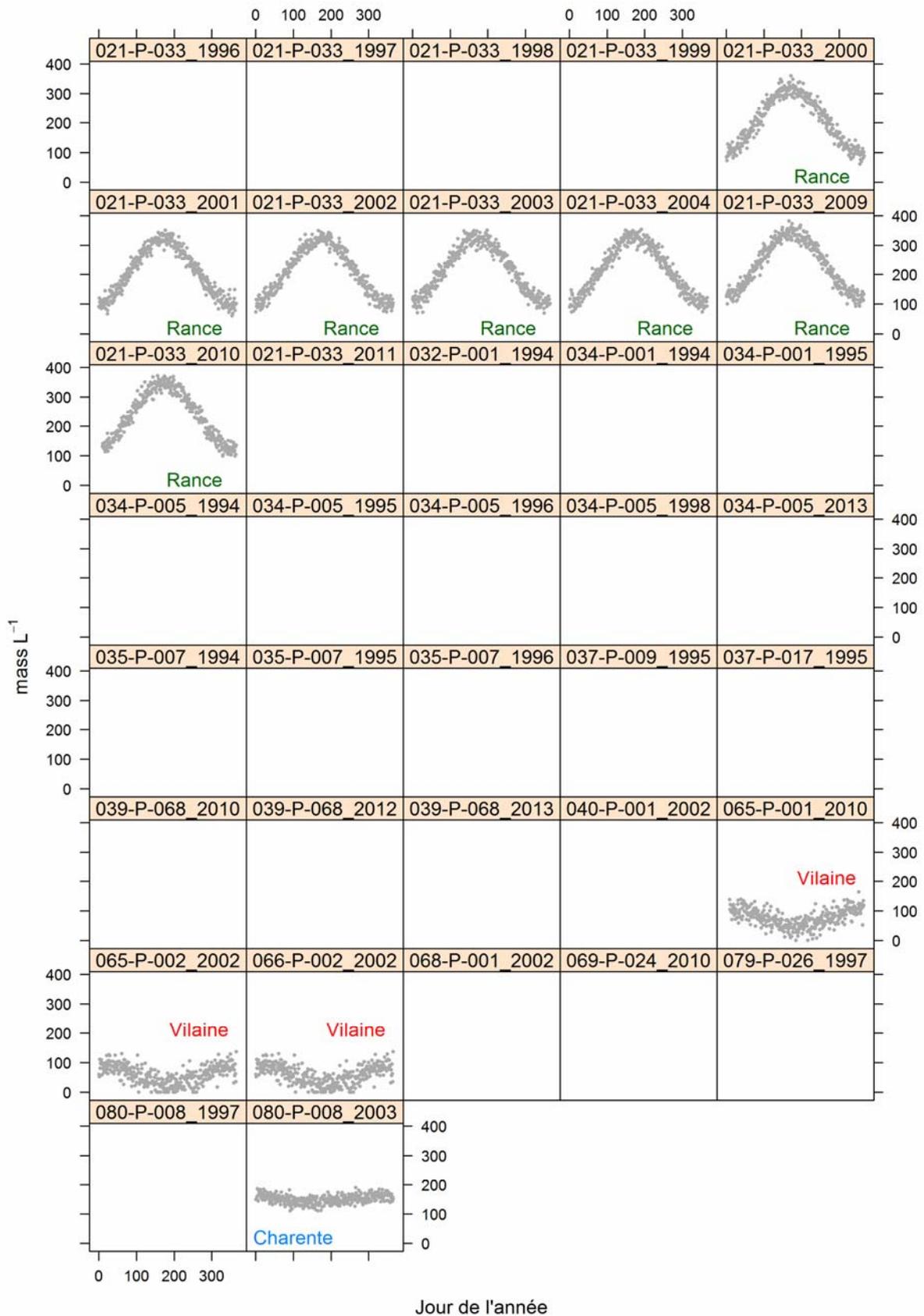
### 18.-Phosphate (Modèle)



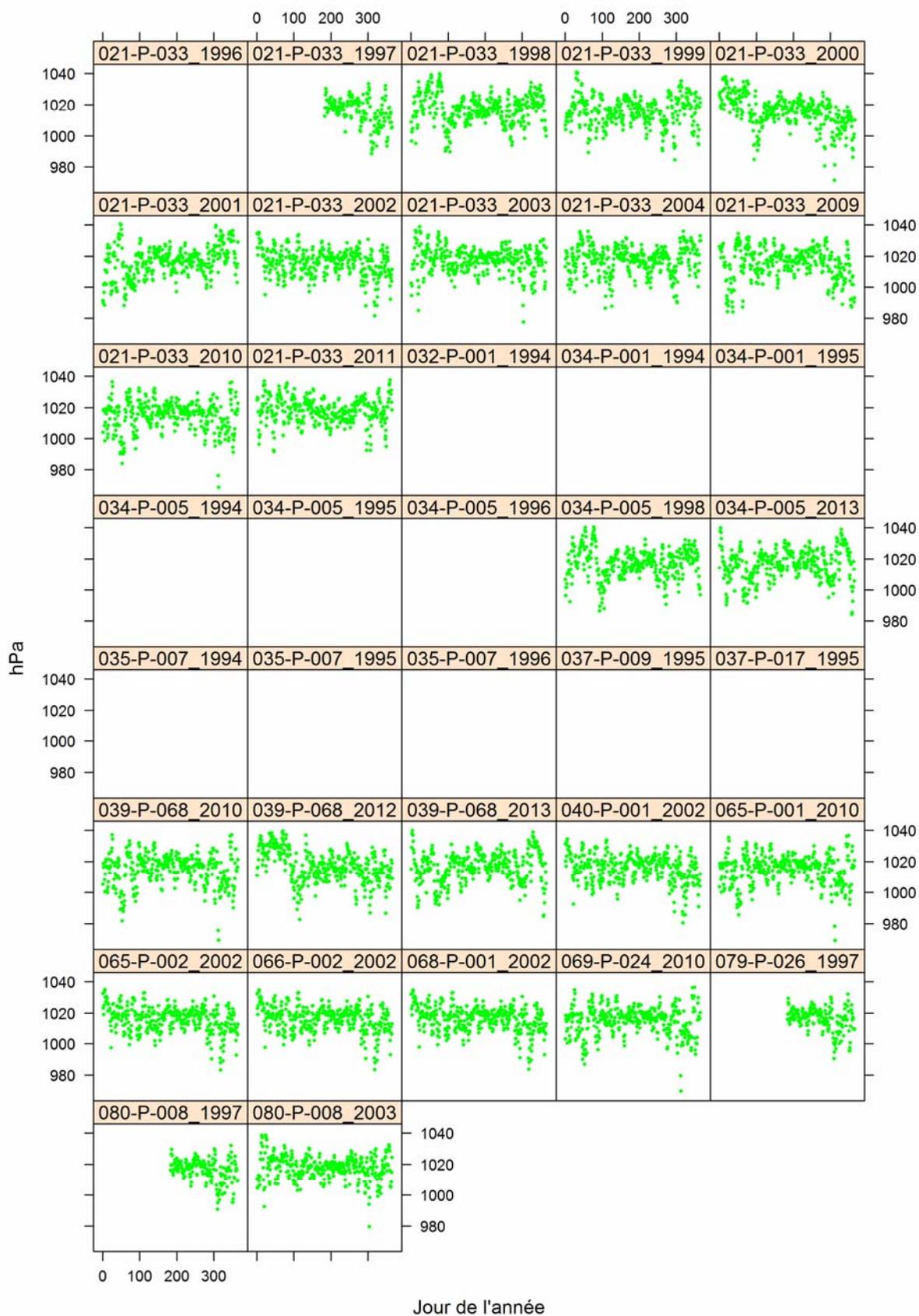
### 19.-Phosphore non inorganique dissous (Modèle)



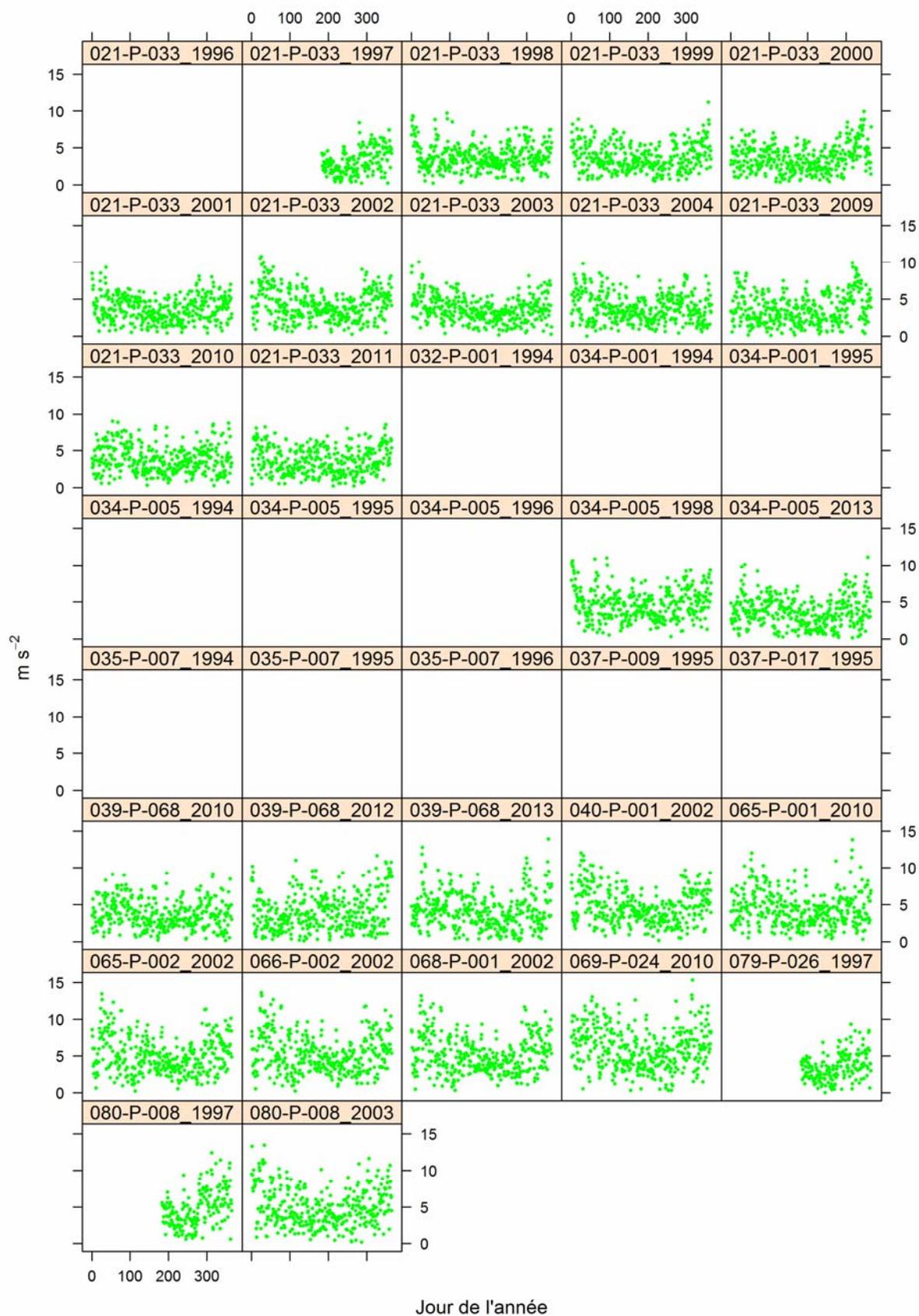
## 20.-Silicate (Modèle)



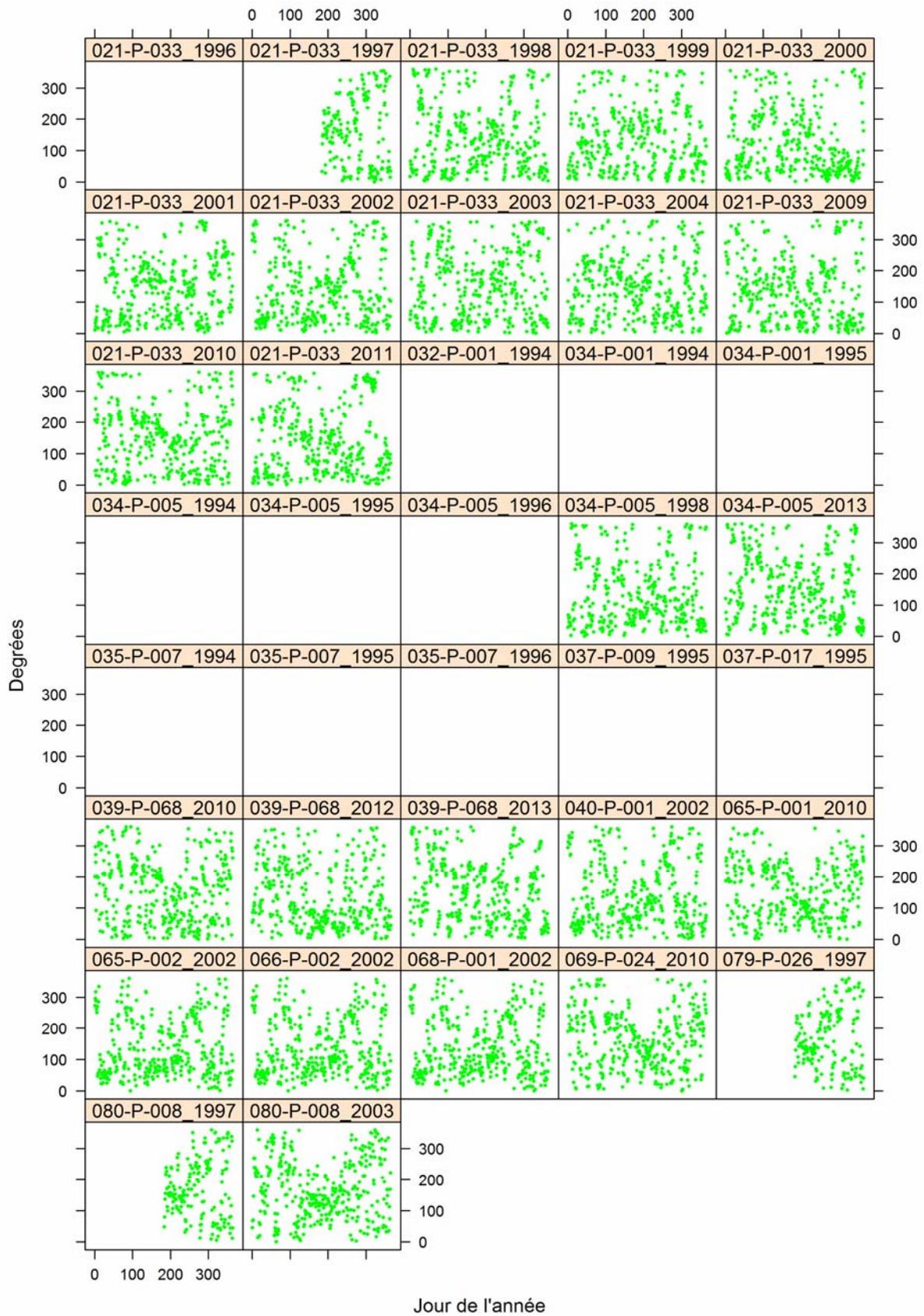
## 21.-Pression atmosphérique



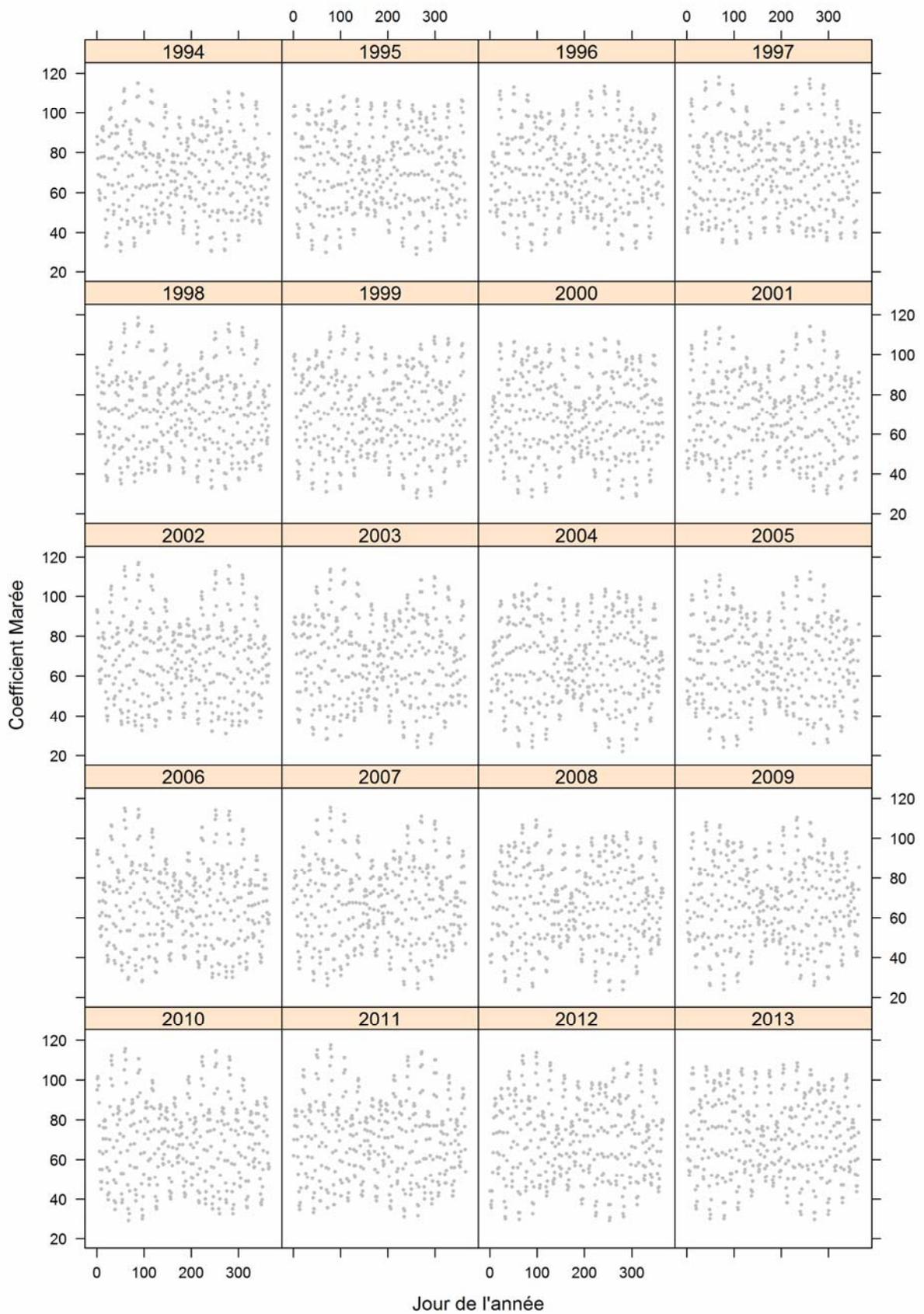
## 22.-Vitesse du vent



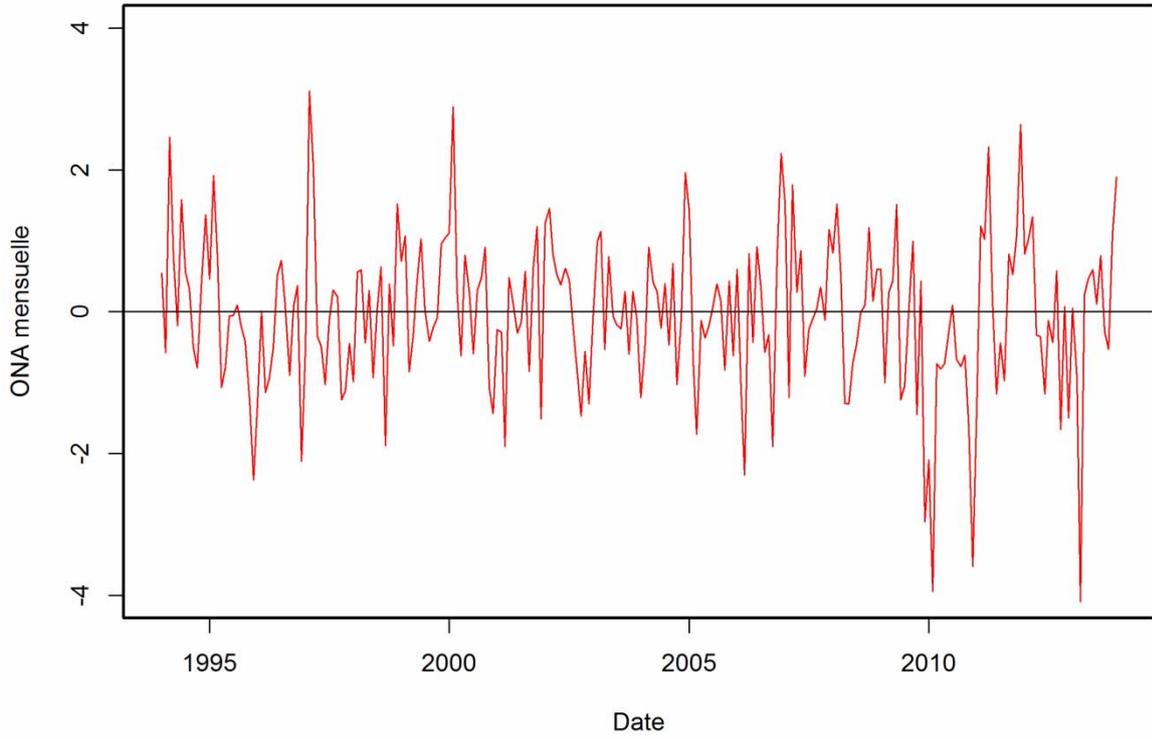
### 23.-Direction du vent



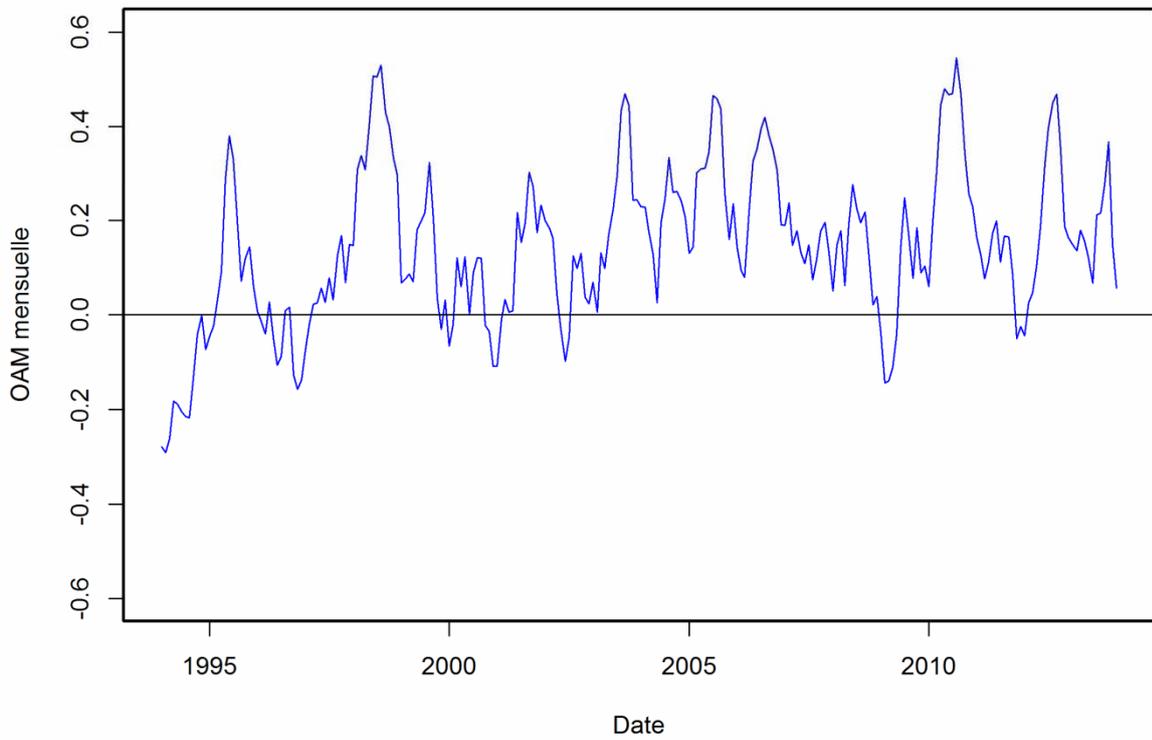
### 24.-Coefficient Marée



### 25.-Index d'Oscillation Nord Atlantique



### 26.-Index d'Oscillation Atlantique Multidécennale



## Annexe II

Corrélation entre variables par station.

### a) Température

Stations	Code région	<i>in situ</i> vs Télédétection	n	<i>in situ</i> vs Modèle	n	Télédétection vs Modèle	n
021-P-033	21	0.96	314	0.95	174	0.99	266
032-P-001	32	0.76	8	NA	0	NA	0
034-P-001	34	0.91	74	NA	0	NA	0
034-P-005	34	0.88	114	NA	0	NA	0
035-P-007	35	0.88	106	NA	0	NA	0
037-P-009	37	0.85	31	NA	0	NA	0
037-P-017	37	0.81	31	NA	0	NA	0
039-P-068	39	0.96	65	NA	0	0.97	38
040-P-001	40	NA	0	NA	0	0.97	30
065-P-001	65	NA	0	NA	0	0.92	14
065-P-002	65	0.59	12	0.75	12	0.82	13
066-P-002	66	0.94	40	0.91	40	0.97	40
068-P-001	68	0.96	10	0.96	10	0.96	28
069-P-024	69	NA	0	NA	0	0.97	23
079-P-026	79	0.96	30	NA	0	NA	0
080-P-008	80	0.99	22	NA	0	0.99	28
Toutes		0.93	857	0.94	236	0.97	480

### b) Descripteurs liés à la salinité.

Stations	Code région	<i>in situ</i> vs Modèle	n	<i>in situ</i> vs traceur	n	Modèle vs traceur	n
021-P-033	21	0.19	258	-0.53	233	-0.28	242
032-P-001	32	NA	0	NA	0	NA	0
034-P-001	34	NA	0	NA	0	NA	0
034-P-005	34	NA	0	NA	0	NA	0
035-P-007	35	NA	0	NA	0	NA	0
037-P-009	37	NA	0	NA	0	NA	0
037-P-017	37	NA	0	NA	0	NA	0
039-P-068	39	NA	0	NA	0	-0.31	38
040-P-001	40	-0.16	30	NA	0	NA	0
065-P-001	65	-0.47	14	0.56	14	-0.57	14
065-P-002	65	0.80	13	0.22	13	0.18	13
066-P-002	66	0.85	40	-0.49	40	-0.40	40
068-P-001	68	0.52	28	-0.37	28	-0.84	28
069-P-024	69	0.32	24	-0.44	24	-0.84	24
079-P-026	79	NA	0	NA	0	NA	0
080-P-008	80	0.74	28	-0.68	28	-0.87	28
Toutes		0.53	435	-0.46	380	-0.51	427

### c) Chlorophylle

Stations	Code région	<i>in situ</i> vs Télédétection	n
021-P-033	21	0.36	248
032-P-001	32	NA	0
034-P-001	34	NA	0
034-P-005	34	NA	0
035-P-007	35	NA	0
037-P-009	37	NA	0
037-P-017	37	NA	0
039-P-068	39	0.20	39
040-P-001	40	-0.06	26
065-P-001	65	NA	0
065-P-002	65	NA	0
066-P-002	66	NA	0
068-P-001	68	0.36	23
069-P-024	69	0.68	24
079-P-026	79	NA	0
080-P-008	80	0.24	25
Toutes		0.30	385

### Annexe III

Représentation graphique des ajustements des 37 séries temporelles annuelles. Chaque encadré correspond à une série temporelle annuelle (station-année). Les cercles bleus sont les valeurs d'abondance d'*A. minutum* (transformées en  $\log_{10}$ ), les lignes noires sont le résultat de l'ajustement de la fonction de Weibull et les ronds rouges sont les dates cardinales (jour de démarrage, de l'abondance maximale et de fin du bloom).

